



Luonnonvara- ja biotalouden tutkimus 42/2022

# Puutuhka-kompostilannoitteen valmistuksen ja käytön ympäristövaikutukset metsälannoituksessa

Kareta Timonen, Antti Pietiläinen, Tarmo Rätty, Marja Jallinoja ja Sirpa Piirainen

Luonnonvara- ja biotalouden tutkimus 42/2022

# **Puutuhka-kompostilannoitteen valmistuksen ja käytön ympäristövaikutukset metsälannoituksessa**

Karetta Timonen, Antti Pietiläinen, Tarmo Rätty, Marja Jallinoja ja Sirpa Piirainen



Vipuvoimaa  
EU:lta  
2014–2020



Euroopan unioni  
Euroopan aluekehitysrahasto

### Viittausohje:

Timonen, K., Pietiläinen, A., Rätty, T., Jallinoja, M. & Piirainen, S. 2022. Puutuhka-kompostilannoituksen valmistuksen ja käytön ympäristövaikutukset metsälannoituksessa. Luonnonvara- ja biotalouden tutkimus 42/2022. Luonnonvarakeskus. Helsinki. 34 s.

Karetta Timonen, ORCID ID, <https://orcid.org/0000-0002-6283-7792>



ISBN 978-952-380-430-2 (Painettu)

ISBN 978-952-380-431-9 (Verkkójulkaisu)

ISSN 2342-7647 (Painettu)

ISSN 2342-7639 (Verkkójulkaisu)

URN <http://urn.fi/URN:ISBN:978-952-380-431-9>

Copyright: Luonnonvarakeskus (Luke)

Kirjoittajat: Karetta Timonen, Antti Pietiläinen, Tarmo Rätty, Marja Jallinoja ja Sirpa Piirainen

Julkaisija ja kustantaja: Luonnonvarakeskus (Luke), Helsinki 2022

Julkaisu vuosi: 2022

Kannen kuva: lentolevitys, lannoitus, Loppi, Erkki Oksanen.

Painopaikka ja julkaisumyönti: PunaMusta Oy, <https://luke.omapumu.com/fi/>

## Tiivistelmä

Karetta Timonen<sup>1)</sup>, Antti Pietiäinen<sup>2)</sup>, Tarmo Rätty<sup>3)</sup>, Marja Jallinoja<sup>4)</sup>, Sirpa Piirainen<sup>3)</sup>

<sup>1)</sup>Luonnonvarakeskus, Biotalous ja ympäristö, Latokartanonkaari 9 PL 2, 00791 Helsinki

<sup>2)</sup>Aalto yliopisto, Kemian tekniikan korkeakoulu, Biotuotteiden ja biotekniikan laitos, Vuorimiehentie 1, 02150 Espoo

<sup>3)</sup>Luonnonvarakeskus, Joensuun toimipaikka, Yliopistokatu 6b, 80100 Joensuu

<sup>4)</sup>Spinverse, Keilasatama 5, 02150 Espoo

Orgaanisista sivuvirroista valmistettujen kierrätyslannoitteiden kehittämisellä pyritään pienentämään maa- ja metsätalouden ympäristövaikutuksia ja neitseellisten ravinteiden käyttöä sekä edistämään ravinteiden kierrätystä. Lisäksi jäteperäisistä tai kierrätetyistä raaka-aineista valmistettujen lannoitteiden valmistuksen ympäristövaikutusten oletetaan olevan pienempiä kuin neitseellisistä ravinteista valmistetuilla väkilannoitteilla. Orgaanisten sivuvirtamassojen hyödyntämisen haasteena on usein niiden lannoitukseen suoraan sopimaton olomuoto kuten suuri vesipitoisuus, haitta-aineet ja vaihtelevat tai pienet ravinnepitoisuudet, jotka vaikuttavat mm. niiden kuljetus- ja levitysmääriin ja -kalustoihin.

Rakiky -hankkeen tavoitteena oli tarkastella paikallisia (Lahden seutu) sivuvirtoja hyödyntävien puutuhkapohjaisten metsälannoitukseen soveltuvien kierrätyslannoitevalmisteiden elinkaarisia ilmastovaikutuksia kasvihuonekaasupäästöillä mitattuina. Sen lisäksi tarkasteltiin rehevöittäviä vaikutuksia käytön osalta. Päästöt laskettiin sisältäen sekä valmistuksen että käytön (lannoitteiden kuljetus, levitys sekä typen ja hiilen kaasumainen haihdunta ja huuhtouma) päästöt typpi- tai fosforikiloa kohden riippuen siitä, nähtiinkö lannoitteen toimivan typpilannoitteena kangasmaiden metsissä vai fosforilannoitteena turvemaiden metsissä. Tavoitteena oli tunnistaa ympäristönäkökulmasta kestävimät tuotteet sekä löytää päästöjen osalta kriittisiä prosessivaihteita.

Tarkasteluun valittiin erilaisia lannoitevalmisteita, joiden pohjana oli Aalto-yliopiston toteuttamissa rakeistuskokeissa tehdyt eri prosessointivaihtoehdot. Lannoitevalmisteen lähtömateriaalina oli puutuhka, johon haettiin ravinnelisäystä kompostista ja ureasta. Lähtömateriaalien valinnassa minimoitiin niiden kuljetusmatkoja lannoitetehtaalalle. Puutuhkan ja kompostin seoksesta valmistetun lannoitteen ympäristövaikutuksia tarkasteltiin kolmen eri prosessointivaihtoehdon kautta. Tutkitut viisi lannoitevalmistetta olivat: Putretti®, tuhka+lämpökäsitelty komposti typpilisällä (urea) ja ilman sekä tuhka+poltettu komposti typpilisällä (urea) ja ilman. Ensimmäisessä, Putretiksi® nimetyssä vaihtoehdossa sekoitettiin käsittelemätön komposti puutuhkaan. Toisessa vaihtoehdossa komposti lämpökäsiteltiin 500 °C:ssä ennen sekoittamista tuhkaan, jolloin suurin osa orgaanisista haitta-aineista saatiin tuhottua. Kolmannessa vaihtoehdossa komposti poltettiin 850 °C ennen sekoittamista tuhkaan. Tässä lämpötilassa tuhoutuivat kaikki orgaaniset haitta-aineet ja mikromuovit.

Tarkasteltaessa aluksi vain valmistuksen päästöjä, Putretti® -lannoitteen ilmastovaikutukset olivat huomattavasti pienemmät typpikiloa kohden kuin väkilannoitteella tai vaihtoehdoilla kierrätyslannoitteiden prosessointimenetelmillä. Lämpökäsitellyn kompostin ilmastovaikutus oli samaa kokoluokkaa kuin väkilannoitteella, mutta puutteellisten mittaustulosten vuoksi tulos ei ole täysin vertailukelpoinen. Poltetun kompostilannoitteen ilmastovaikutus oli huomattavasti suurempi kuin väkilannoitteen.

Metsäkäytön osalta kaikkien lannoitteiden osalta kuljetusten ja levitysten hiilidioksidipäästöt (CO<sub>2</sub>) olivat merkittävästi pienemmät kuin lannoitteiden käytön N<sub>2</sub>O -päästöt. Puutuhkapohjaisten kierrätyslannoitteiden ilmastovaikutukset kangasmaalla typpikiloa kohden olivat hieman suuremmat kuin väkilannoitteen. Tämä johtuu siitä, että väkilannoitteiden dityppioksidipäästökertoimet (IPCC 2006) ovat hieman pienemmät kuin tarkasteltujen kierrätyslannoitteiden. Tämän lisäksi väkilannoitteiden suuremmat typpipitoisuudet vähensivät kuljetusten ja levitysten tarvetta ja päästöjä pienempipitoisempiin kierrätyslannoitteisiin verrattuna. Putretti® lannoituksen metsäkäytön päästöt olivat suurimmat typpikiloa kohden, vaikka Putretin® typen levityksen määrä oli vain 170 kg/ha ja pienempi kuin muilla lannoitteilla (200–250 kg/ha). Jos typen levitysmäärä nostettaisiin samalle tasolle väkilannoitteen kanssa, jouduttaisiin Putrettia® kuljettamaan ja levittämään vielä enemmän hehtaarikohtaisesti ja polttoainekulutusten päästö kasvattaa Putretti® lannoitukseen metsäkäytön päästöjä entisestään.

Käytön osalta tarkasteltiin myös rehevöittäviä vaikutuksia. Lannoitteiden rehevöittävien vaikutusten välillä ei ollut huomattavia eroja. Kangasmaalla ei katsottu muodostuvan fosforihuuhtoumia ja typpihuuhtoumat olivat kaikilla lannoitteilla yhtä suuret levitettyä typpikiloa kohden. Rehevöittäviin vaikutuksiin muodostui pieniä eroja vain polttoainekulutusten rehevöittävästä laskeumista johtuen ja riippuen siitä, tapahtuiko levitys helikopterilla vai metsätraktorilla.

Käytön osalta kierrätyslannoitteiden ilmastovaikutukset turvemaiden metsässä fosforikiloa kohden olivat suuremmat kuin väkilannoitteen. Fosforilannoitukseen sopivat kierrätyslannoitteet (Putretti® ja tuhka+lämpökäsitelty kompostilannoite ilman typpilisää) sisälsivät myös typpeä, mikä muodosti merkittävät erot N<sub>2</sub>O -päästöjen välillä verrattuna typpivapaisiin lannoitteisiin (tuhka+poltettu kompostilannoite ilman typpilisää ja väkilannoite). Etenkin Putretti® -lannoitteen suuri typpipitoisuus fosforikiloa kohti nosti sen N<sub>2</sub>O -päästöt merkittäviksi verrattuna muihin lannoitteisiin turvemaiden lannoituksessa. Turvemaiden metsien kierrätyslannoitteissa pitäisi pyrkiä vähän typpeä ja runsaasti kaliumia ja fosforia sisältäviin lannoitteisiin, jolloin ylimääräiset päästöt minimoituvat. Rehevöittävät vaikutukset ovat traktorilevityksessä turveilla selkeästi pienempiä kuin helikopterilevityksessä, sillä traktorilevityksessä huuhtoumia metsäoijiin ei oletettu muodostuvan ja helikopterilevityksessä huuhtoumia oijiin on puolestaan hankala välttää.

Elinkaaristen ilmastovaikutusten näkökulmasta, eli kun tarkastellaan sekä valmistusten että metsäkäytön ilmastopäästöjä yhdessä, Putretti® -lannoite on kangasmaametsien typpilannoitteena kestävin vaihtoehto. Valmistuksen ja käytön yhteenlasketut päästöt olivat Putretti® -lannoitteella typpikiloa kohti (CO<sub>2</sub> ekv./kg N) pienemmät kuin verrokkina olleella väkilannoitteella tai typpilisällä täydennetyllä tuhka+lämpökäsitellyllä ja tuhka+poltetulla kompostilannoitteella. Myös Putretti® lannoituksen hehtaarikohtainen päästö (CO<sub>2</sub> ekv./ha) on pienempi ja vaikka sen laskennassa käytetty pienempi typen levitysmäärä (170 kg/ha) nostettaisiinkin samalle tasolle väkilannoitteen kanssa (200–250 kg/ha), jää hehtaarikohtainen päästö Putretti® -lannoituksessa pienemmäksi.

**Asiasanat:** elinkaarianalyysi, ilmastovaikutus, kasvihuonekaasupäästöt, kierrätyslannoite, kierrätyslannoitevalmiste, putretti, rehevöittävät päästöt, ympäristövaikutukset.



# Sisällys

<b>1. Johdanto .....</b>	<b>6</b>
<b>2. Materiaalit ja menetelmät .....</b>	<b>7</b>
2.1. Ketjukuvaus ja systeimirajaukset .....	7
2.2. Skenaariot .....	8
2.3. Lähtötiedot .....	12
2.4. Laskentamenetelmät.....	13
2.4.1. Kierrätyslannoitevalmisteiden valmistuksen päästöt .....	15
2.4.2. Kierrätyslannoitevalmisteiden käytön päästöt .....	15
<b>3. Tulokset ja tulosten tarkastelu .....</b>	<b>17</b>
3.1. Lannoitetuotteiden valmistuksen ilmastovaikutukset .....	17
3.1.1. Typpilannoitteet .....	17
3.1.2. Fosforilannoitteet .....	20
3.2. Lannoitetuotteiden metsäkäytön ilmastovaikutukset.....	21
3.2.1. Typpilannoitteet kangasmaiden metsissä.....	21
3.2.2. Fosforilannoitteet turvemaiden metsissä.....	22
3.3. Lannoitetuotteiden elinkaariset ilmastovaikutukset.....	24
3.3.1. Typpilannoitteet .....	24
3.3.2. Fosforilannoitteet .....	26
3.4. Lannoitetuotteiden metsäkäytön rehevöittävät vaikutukset .....	27
3.4.1. Typpilannoitteet kangasmaiden metsissä.....	27
3.4.2. Fosforilannoitteet turvemaiden metsissä.....	27
<b>4. Johtopäätökset ja jatkotutkimustarpeet .....</b>	<b>30</b>
<b>Viitteet.....</b>	<b>32</b>

# 1. Johdanto

Sivuvirtamassojen jalostamisella kierrätyslannoitteiksi pyritään edistämään ravinteiden kierräystä ja vähentämään maa- ja metsätalouden ympäristövaikutuksia kaivannaisiin perustuviin ja/tai tuotantoprosessiltaan hyvin energiaintensiivisiin neitseellisiin lannoitteisiin verrattuna. Lisäksi jäteperäisistä tai kierrätetyistä raaka-aineista valmistettujen lannoitteiden valmistuksen ympäristövaikutusten oletetaan olevan pienempiä kuin neitseellisistä ravinteista valmistetuilla väkilannoitteilla. Orgaanisten sivuvirtamassojen hyödyntämisen haasteena on usein niiden lannoitukseen suoraan sopimaton olomuoto kuten suuri vesipitoisuus, haitta-aineet ja vaihtelevat tai pienet ravinnepitoisuudet, jotka vaikuttavat mm. niiden kuljetus- ja levitysmääriin ja -kalustoihin.

Rakiky -hankkeessa arvioitiin puutuhka- ja kompostipohjaisten lannoitevalmisteiden ominaisuuksia ja soveltuvuutta metsälannoitteeksi. Tavoitteena oli selvittää näiden lannoitteiden valmistuksen ja käytön kasvihuonekaasupäästöt sekä vesistö- ja ilmapäästöt (rehevöittämisvaikutus) verrattuna väkilannoitteisiin, sekä löytää näiden päästöjen kannalta kriittiset vaiheet lannoitteiden valmistus-käyttö -ketjussa. Hankkeessa tarkasteltiin erilaisia kierrätyslannoitevalmisteita, joiden lähtömateriaalina olivat puutuhka, komposti ja urea sekä boori. Lähtöaineita prosessoitiin eri tavoin lannoitteen laadun parantamiseksi. Ensimmäisessä vaihtoehdossa, Putretissa®, sekoitettiin käsittelemätön komposti puutuhkaan, jolloin saatiin lannoitteen typpipitoisuutta lisättyä. Toisessa vaihtoehdossa komposti lämpökäsiteltiin 500 °C:ssä hapellisissa olosuhteissa ennen sekoittamista tuhkaan, jolloin suurin osa orgaanisista haitta-aineista saatiin tuhottua. Kolmannessa vaihtoehdossa komposti poltettiin 850 °C ennen sekoittamista tuhkaan. Tässä lämpötilassa tuhoutuivat kaikki orgaaniset haitta-aineet ja mikromuovit. Koska prosessoinnissa menetetttiin typpeä, sitä lisättiin osaan tuotteista ureana. Erilaisia lannoitevaihtoehtoja oli viisi: Putretti® -lannoite (käsittelemätön tuhka+komposti), tuhka+lämpökäsitelty komposti ilman typpilisää ja typpilisällä, sekä tuhka+polttettu komposti ilman typpilisää ja typpilisällä.

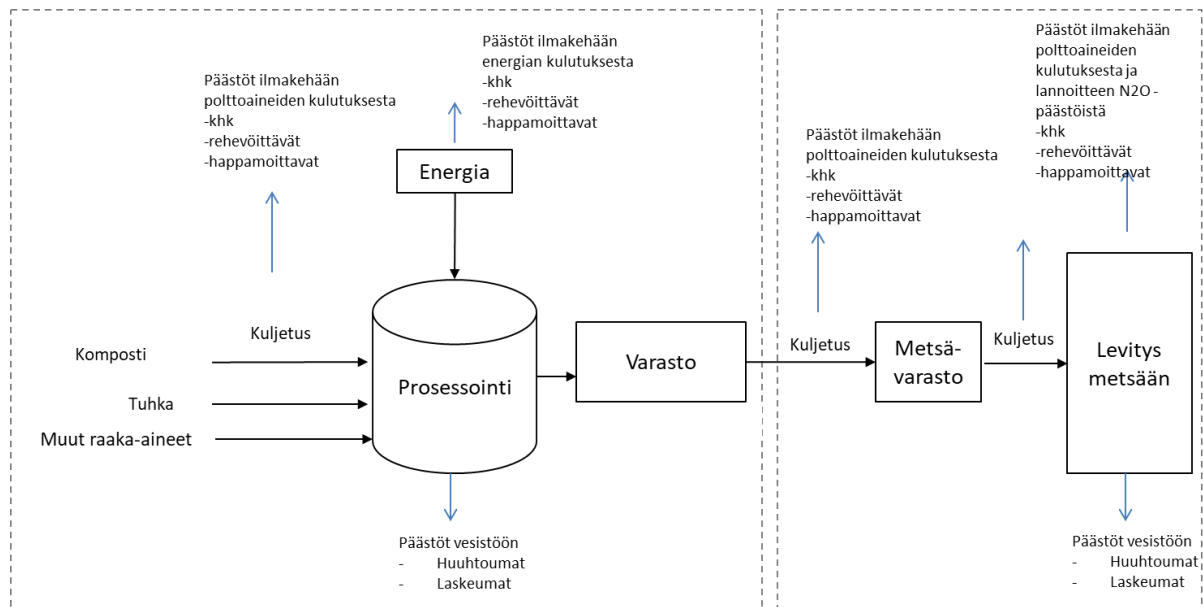
Lannoitteiden valmistuksen päästöt laskettiin lannoitetyyppi- ja fosforikiloa kohden. Tavoitteena oli tunnistaa prosessit, joilla on suurin ilmastovaikutus sekä verrata eri vaihtoehtojen ympäristökestävyyttä olemassa oleviin väkilannoitteisiin.

Käytön päästöt eri lannoitteille laskettiin typpi- tai fosforikiloa kohden sen mukaan, ajateltiin lannoitteen toimivan typpilannoitteena kangasmaiden metsissä vai fosforilannoitteena turve- maiden metsissä. Tämän lisäksi tarkasteltiin vielä eri levitystekniikoiden, metsätraktori tai lentolevitys, ympäristövaikutuksia.

## 2. Materiaalit ja menetelmät

### 2.1. Ketjukuvaus ja systeemirajaukset

Varsinainen tarkastelu koostui kahdesta pääprosessista: kierrätyslannoitteiden valmistus/jalostusprosessi ja lannoitteen käyttö (Kuva 1).



**Kuva 1.** Ketjukuvaus, khh=kasviuonekaasut.

Lannoitteiden pääraaka-aineena ollut tuhka tuli puunpoltosta energialaitokselta ja kompostin lähtöaineina olivat mädätetty puhdistamoliete ja erilliskerätty biojäte. Lannoitteiden prosessointivaihtoehtoja oli kolme:

- Ensimmäisessä tuhka sekoitettiin käsittelemättömään kompostiin. Koska tuhka nosti kompostin pH:ta, vapautui sekoituksessa ammoniakkia. Sen talteenotto oli mallinnettu kaasupesurilla, jossa käytettiin rikkihappoa, jonka kanssa ammoniakki reagoi muodostaen ammoniumsulfaattia. Sekokseen lisättiin myös booria Boraxina (natriumtetraboraatti). Tyypillisää ei tarvittu, koska komposti sisälsi runsaasti typpeä, josta poistui vain pieni osa sekoituksen yhteydessä. Sekoituksen jälkeen lannoite briketöitiin, koska käsittelemätön komposti ei rakeistu.
- Toisessa vaihtoehdossa komposti lämpökäsiteltiin eli kuumennettiin 500 °C:een ennen sekoittamista tuhkan kanssa. Lämpökäsittely tapahtui 1 MW:n lämpölaitoksessa maakaasupolttimella varustetussa arinakattilassa. Prosessissa vapautui kaikki kompostin typpi, joten booria (Borax) lisäksi sekoitusvaiheessa lisättiin tarvittaessa typpeä ureana. Sekoituksen jälkeen lannoite rakeistettiin.
- Kolmannessa vaihtoehdossa komposti poltettiin 850 °C:ssa 1 MW:n lämpölaitoksessa maakaasupolttimella varustetussa arinakattilassa ennen sekoittamista tuhkan kanssa. Kompostin polttaminen vaati tukipolttoaineeksi puuhaketta. Prosessiin lisättiin kalkkia ehkäisemään rikin oksidien vapautuminen ilmaan. Sekoitusvaiheessa lisättiin poistuneen typen tilalle ureaa ja booria Boraxina. Sekoituksen jälkeen lannoite rakeistettiin.



Valmistuksen jälkeen lopputuote kuljetettiin puoliperävaunulla (kantavuus 25 tn) 50 km matka tehdasvarastolta metsävarastolle. Tämän jälkeen tapahtui kuljetus 0,5 km metsävarastolta metsään riippuen siitä valittiinko maa- vai lentolevitys. Maalevityksessä lannoite kuljetettiin metsätraktorilla (kuormakoko 6 tn) metsään, levitettiin siellä ja metsätraktori palasi tyhjänä takaisin. Lentolevityksellä lannoite kuljetettiin metsävarastolta helikopterilla metsään, levitettiin siellä ja lentokone palasi takaisin varastolle.

## 2.2. Skenaariot

Tarkasteltavana oli viisi erilaista kierrätyslannoitteiden prosessointiskenaariota, joissa kaikissa orgaanisena raaka-aineena oli komposti ja epäorgaanisena puutuhka (Taulukko 1). Lämpökäsitellyn kompostin ja puutuhkan seoksesta (2) sekä poltetun kompostin ja puutuhkan seoksesta (3) otettiin tarkasteltavaksi kaksi eri vaihtoehtoa: typpilisäyksellä (2.2. ja 3.2.) ja ilman typpilisäystä (2.1. ja 3.1.). Kierrätyslannoitevalmisteiden ympäristövaikutuksia verrattiin vastaaviin olemassa oleviin väkilannoitteisiin (R1 ja R2), joita tutkimuksessa käsiteltävät kierrätyslannoitteet korvaisivat metsien lannoituksessa.

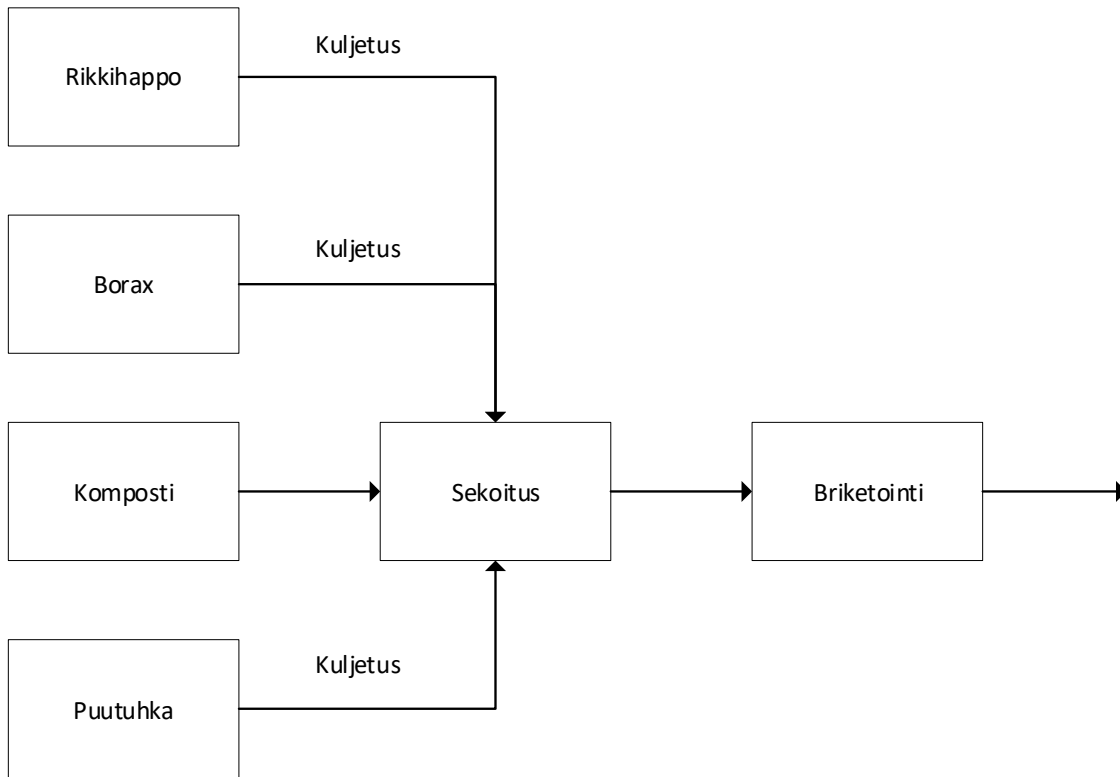
**Taulukko 1.** Tarkasteltavat lannoitevalmisteet ja niiden käyttötarkoitus.

Lannoite	Lannoitetuotteen nimi	Skenaario		Käyttökohteet
1	Käsittämätön komposti ja puutuhka (Putretti®)	1.0	Ilman typpilisäystä	Kangasmaat/ Turvemaat
2	Lämpökäsitelty komposti ja puutuhka	2.1	Ilman typpilisäystä	Turvemaat
		2.2	Typpilisällä	Kangasmaat
3	Poltettu komposti ja puutuhka	3.1	Ilman typpilisäystä	Turvemaat
		3.2	Typpilisällä	Kangasmaat
Referenssi-lannoitteet	YaraMila, Metsän NP-lannoite (Yara)	R1		Kangasmaat
	Rauta PK-lannoite (Yara)	R2		Turvemaat

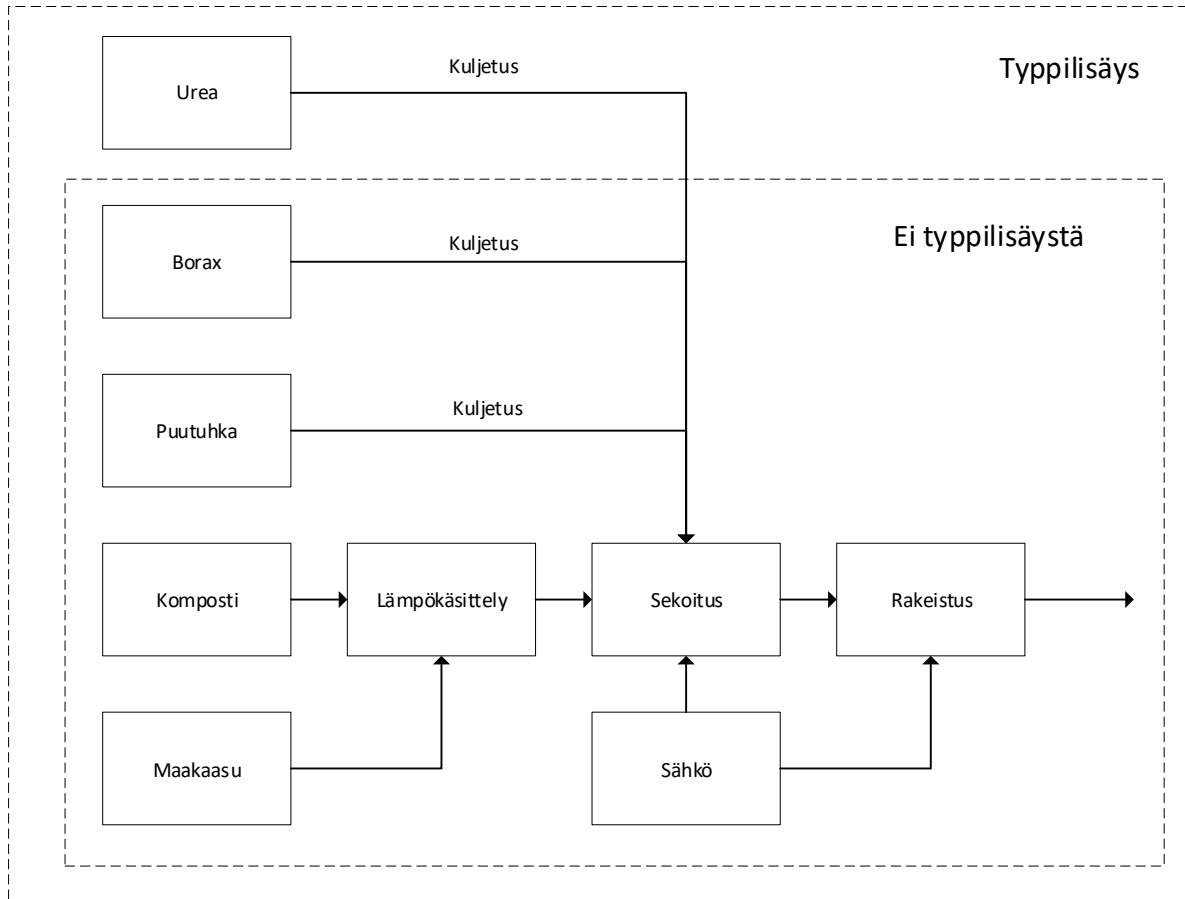
Ensimmäisessä, Putretti® -lannoitetuotteeksi nimetyssä prosessointivaihtoehdossa (skenaario 1.0) käsittämätön komposti, puutuhka ja boori sekoitetaan, jonka jälkeen seos briketöidään levittämisen helpottamiseksi (Kuva 2). Kompostin ja tuhkan sekoitussuhde oli 3:1. Sekoituksen yhteydessä vapautuva ammoniakki otetaan talteen kaasustripperissä rikkihapolla. Talteenoton oletettiin tapahtuvan 90 % tehokkuudella, ja rikkihapon kulutus laskettiin stoikiometrisesti. Rikkihapon laimennukseen käytettyä tarkkaa vesimäärää ei saatu arvioitua, koska kokeissa ei onnistuttu varmuudella määrittämään talteenoton tehokkuutta. Menetelmä on kuitenkin todistettu toimivaksi (Tao & Ukwuani 2015). Boori, rikkihappo ja tuhka kuljetetaan puoliperävaunurekalla (16–32 tn) lannoitetehtaalle. Kompostia ei tarvitse kuljettaa, koska lannoitetehtaan sijainniksi valittiin kompostilaitoksen sijainti. Koska typpeä vapautuu sekoitusprosessissa vain vähän (alle 10 %), ei typpilisäystä tarvita. Lannoitevalmisteen ravinnepitoisuudet löytyvät taulukosta 2.

Toisessa vaihtoehdossa komposti lämpökäsitellään 500 °C:ssa (Kuva 3; skenaario 2.1), jolloin yleisimmät muovit ja suuri osa lääkkejäämistä tuhoutuvat (Valuatlas, Peng & Kong 2007, Svahn & Björklund 2015, chemicalbook.com, chemspider.com, Tita et al. 2017). Käsitelyn seurauksena kompostista poistuu kuitenkin myös lähes kaikki typpi ja 90 % hiilestä. Poistuneen typen korvaajana käytetään tarvittaessa ureaa (skenaario 2.2.) ja boori lisätään samalla kun komposti sekoitetaan puutuhkaan. Kompostin ja puutuhkan sekoitussuhde on 1:1. Lopuksi seos

rakeistetaan, jotta levitys olisi helpompaa. Boori, urea ja tuhka kuljetetaan puoliperävaunurekalla (16–32 tn) lannoitetehtaalle. Kompostia ei tarvitse kuljettaa, koska lannoitetehtaan sijainniksi valittiin kompostilaitoksen sijainti. Lannoitteen ravinnepitoisuudet löytyvät taulukosta 2.

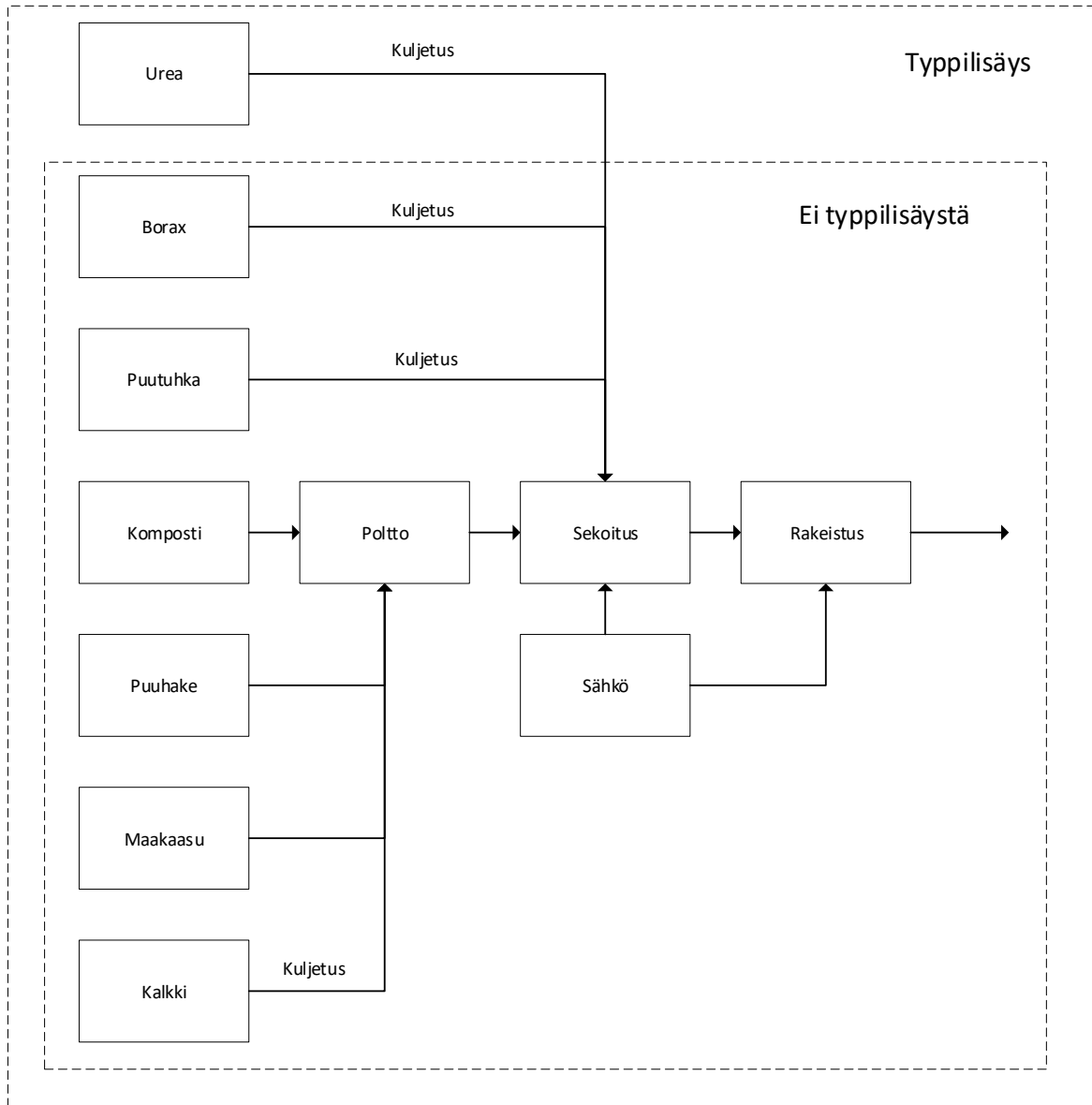


**Kuva 2.** Putretin® valmistuskaavio.



**Kuva 3.** Lämpökäsitellyn kompostin ja puutuhkaseoksen valmistuskaavio.

Kolmannessa käsittelyvaihtoehdossa komposti poltetaan 850 °C:ssa, jolloin kaikki lääkejäämät ja muovit tuhoutuvat (Kuva 4; skenaario 3.1.). Samalla kompostista poistuu kaikki typpi ja hiili. Poistunut typpi korvataan tarvittaessa urealla (skenaario 3.2.) ja se lisätään sekoitusvaiheessa yhdessä boorin kanssa. Kompostin kosteuspitoisuus on melko suuri (n. 65 %) ja polttoarvo alhainen. Tästä syystä palaminen ei ylläpidä itseään, joten polttoon joudutaan syöttämään puuhaketta tukipolttoaineena. Komposti-hakesuhde, jolla palaminen vaatii vain vähän maakaasupolttimen apua, on 1:4. Poltossa vapautuu runsaasti rikin oksideja, joiden lähde on komposti. Tätä ilmapäästöä hillitsemään polttoprosessiin lisätään kalkkia (kalsiitti), joka on louhittu Storrugnsin louhokselta Gotlannista. Kalkki jää poltossa pohjatuhkaan eli lopputuotteeseen, jonka kalkkipitoisuus on 83 %. Tästä johtuen kompostin ravinnepitoisuudet laimenevat huomattavasti polttoprosessissa. Boori, urea, puuhake ja tuhka kuljetetaan puoliperävaunurekalla (16–32 tn) lannoitetehtaalle. Kalkki kuljetetaan autolautalla ja puoliperävaunurekalla (16–32 tn). Kompostia ei tarvitse kuljettaa, koska lannoitetehtaan sijainniksi valittiin kompostilaitoksen sijainti. Lannoitteen ravinnepitoisuudet löytyvät taulukosta 2.



**Kuva 4.** Poltetun kompostin ja puutuhkaseoksen valmistuskaavio.

Referenssilannoitteiksi valittiin väkilannoitteet, joiden valmistuksen ilmastovaikutukset olivat tiedossa, ja joita korvaamaan kierrätyslannoitteita voisi käyttää. YaraMila Metsän NP -lannoite (R1) katsottiin olevan hyvä referenssi kangasmaille levitettäville typpipitoisille kierrätyslannoitteille (1.0., 2.2. ja 3.2.). Typetön referenssivaihtoehto Yaralla oli Rauta-PK (R2) ja sen katsottiin olevan hyvä referenssi turvemaiden metsiin levitettäville fosforipitoisille kierrätyslannoitteille (1.0., 2.1. ja 3.1.). Rauta-PK:ta ei kuitenkaan enää valmisteta, koska tuhkalannoitteet (puutuhka) ovat vähentäneet muiden PK -lannoitteiden tarvetta turvemaidella. Rauta-PK otettiin tähän kuitenkin referenssiksi, koska se on ollut käytössä täsmätuotteena suometsissä.

**Taulukko 2.** Kierrätyslannoitteiden ja referenssilannoitteiden ravinnepitoisuudet.

Lannoite	Skenaario		N %	P %	K %	B %	C %
<b>Käsittämätön komposti ja puutuhka (Putretti®)</b>	1.1.	Ilman typpilisäystä	3,4	1,5	1,7	0,09	0,0
<b>Lämpökäsitelty komposti ja puutuhka</b>	2.1.	Ilman typpilisäystä	0,40	1,3	3,5	0,09	5,5
	2.2.	Typpilisällä	4,7	1,1	3,2	0,09	5,0
<b>Poltettu komposti ja puutuhka</b>	3.1.	Ilman typpilisäystä	0,0	0,50	3,0	0,09	0,0
	3.2.	Typpilisällä	4,7	0,45	2,7	0,09	0,0
<b>YaraMila NP -lannoite</b>	R1		25,0	2,0	0,0	0,3	0,0
<b>Rauta PK -lannoite</b>	R2		0,0	8,0	0,0	0,00	0,0

### 2.3. Lähtötiedot

0 on esitetty lannoitteiden hehtaarikohtaiset levitysmäärät. Putretti® -lannoite (1.0) ja puutuhkan ja kompostin seoslannoitteet typpilisällä (2.2. ja 3.2.) ovat ravintosisältönsä puolesta sopivia kangasmaametsien kasvatuslannoituksessa. Näiden kierrätyslannoitteiden typpipitoisuus on kuitenkin alhainen verrattuna referenssinä toimivaan YaraMila -väkilannoitteeseen, joten niitä joudutaan levittämään hehtaarikohtaisesti enemmän, jotta tarvittava typpilisä metsään täyttyy. Jotta kierrätyslannoitteiden levitys olisi taloudellisesti kannattavaa (nykyisillä menetelmillä), rajattiin maksimilevitysmäärä Putrettia® kangasmaille 5 tn/ha ja siten hehtaarikohtainen typpimäärä jäi vain 170 kg hehtaarille. Lämpökäsiteltyä ja poltettua kompostia puutuhkalla ja typpilisällä (2.2. ja 3.2.) levitetään Putrettia® hieman korkeamman typpipitoisuutensa takia 4 tn/ha, jolla saadaan typen määräksi 200 kg/ha. Typpilannoitteiden referenssilannoitetta (YaraMila) levitetään vain 1 tn/ha korkean typpipitoisuuden (25 %) vuoksi ja siten typen levitysmäärä on 250 kg/ha.

Tutkimuksessa tarkasteltiin myös vaihtoehtoa, jossa Putretti® -lannoitetta ja kierrätyslannoitteita ilman typpilisäystä (2.1 ja 3.1.) käytetään fosforilannoitteena turvemaiden metsissä, koska sen fosforipitoisuus oli siihen sopiva. Turvemaiden lannoituksen tarkoitus on korjata mahdollisia ravinnepuutoksia, joista yleisimpiä ovat fosforin ja kaliumin puutokset. Lannoitteiden sisältämä pieni määrä typpeä ei estä sen käyttöä turvemaiden, mutta siitä ei ole varsinaisesti hyötyä, koska turvemaiden on yleensä typpeä riittävästi. Typpeä ei siksi lisätty turvemaiden metsien lannoitteisiin (2.2. ja 3.2.). Putrettin® (1.0) ja käsiteltyjen puutuhka ja kompostiseoslannoitteiden, ilman typpilisää (2.1. ja 3.1.), levitysmääräksi muodostui fosforipitoisuuden ja taloudellisesti järkevän levitysmäärän perusteella 5 tn/ha. Siten fosforin hehtaarikohtaiset levitysmäärät vaihtelevat lannoitteen fosforipitoisuuden mukaan 45–75 kg P/ha. Fosforilannoitteiden kaupallista referenssilannoitetta (RautaPK) levitetään vain 1 tn/ha korkean fosforipitoisuuden (8 %) vuoksi ja siten fosforin levitysmäärä on sillä 80 kg/ha.

**Taulukko 3.** Lannoitteiden hehtaarikohtaiset ravinne- ja levitysmäärät (kg/ha).

Lannoite	Skenaario		N ravinne- määrä kg/ha	P ravinne- määrä kg/ha	Lannoitemäärä kg/ha
Käsittämätön komposti ja puutuhka (Putretti®)	1.1.	Ilman tyypillisää	170	75	5 000
Lämpökäsitelty komposti ja puutuhka	2.1.	Ilman tyypillisää	20	62,5	5 000
	2.2.	Tyypillisällä	200	45,2	4 000
Poltettu komposti ja puutuhka	3.1.	Ilman tyypillisää	0	25	5 000
	3.2.	Tyypillisällä	200	18	4 000
YaraMila NP -lannoite	R1		250	20	1 000
Rauta PK -lannoite	R2		0	80	1 000

Metsätraktorin levityksen hehtaarikohtainen ja helikopterin tuntikohtainen polttoaineenkulutus litroissa perustuvat asiantuntija-arvioon. Helikopterin polttoaineen kulutus sisältää sekä kuljetuksen metsävarastolta metsään ja levityksen metsässä ja sen arvioitiin olevan 170 l/ha (0). Työmäärä hehtaaria kohden nousee tai laskee annostusmäärän mukaan. Asiantuntija-arvioiden mukaan, kun kierrätyslannoitetta levitetään 5 tn/ha niin helikopterilla voidaan levittää tunnissa 30 tonnia lannoitetta. Kun kierrätyslannoitetta tyypillisällä (2.2. ja 3.2.) levitetään 4 tn/ha niin helikopterilla levitetään tunnissa 29,5 tonnia lannoitetta. Väkilannoitteita levitetään korkeamman ravinnepitoisuuden vuoksi vain noin 1 tn/ha, niin itse kontin purkuvaihe kestää 4–5 kertaa pidempään ja tuottavuus putoaa 23,6 t/h. Toisaalta hehtaari tuottavuus paranee noin 9,5 hehtaariasta 28,5 hehtaariin (lento)tunnissa.

## 2.4. Laskentamenetelmät

Hankkeessa arvioitiin kierrätyslannoitteiden valmistuksen ja käytön elinkaarisia ympäristövaikutuksia verrattuna vastaavien väkilannoitteiden ympäristövaikutuksiin noudattaen kansainvälisiä elinkaariarviointimenetelmän standardeja (ISO 2006a, ISO 2006b) ja IPCC:n (2006) laskentaohjeistuksia, sekä soveltaen tässä raportissa esitettyjä rajauksia ja oletuksia.



**Taulukko 4.** Työkoneiden tuottavuus ja polttoaineen kulutukset eri lannoitetyyppien mukaisesti.

Metsätraktorilevitys		Annostus, tn/ha	Tuottavuus		Polttoaineen kulutus	
			tn/h	ha/h	l/h	l/ha
<b>S1</b>	1.1	5	7,3	1,5	14	9,6
<b>S2</b>	2.1.	5	7,3	1,5	14	9,6
	2.2.	4	6,8	1,7	14	8,2
<b>S3</b>	3.1.	5	7,3	1,5	14	9,6
	3.2.	4	6,8	1,7	14	8,2
<b>R1</b>	YaraMila NP	1	3,4	3,4	14	4,1
<b>R2</b>	Rauta PK	1	3,4	3,4	14	4,1
Helikopterilevitys		Annostus, tn/ha	Tuottavuus		Polttoaineen kulutus	
			tn/h	ha/h	l/h	l/ha
<b>S1</b>	1.1	5	30,0	6,0	170	28,3
<b>S2</b>	2.1.	5	30,0	6,0	170	28,3
	2.2.	4	29,5	7,4	170	23,0
<b>S3</b>	3.1.	5	30,0	6,0	170	28,3
	3.2.	4	29,5	7,4	170	23,0
<b>R1</b>	YaraMila	1	23,6	23,6	170	7,2
<b>R2</b>	Rauta PK	1	23,6	23,6	170	7,2

Tarkastellut ympäristövaikutusluokat ovat ilmastonmuutos (kasvihuonekaasupäästöt, hiilidioksidiekvivalentti, kg CO<sub>2</sub>-ekv.) (Munoz & Schmidt 2016) sekä CLM baseline v.3.06 metodin (Guinée et al., 2002) mukainen vesistöjen rehevöityminen (fosfaattiekvivalentti, kg PO<sub>4</sub><sup>3-</sup>-ekv.). Ketjuissa syntyvät päästöt yhteismitallistettiin ympäristövaikutusluokkiin näiden menetelmien mukaisilla ekvivalenttikertoimilla (Taulukko 5). Ilmastopäästöjen laskennassa huomioitiin kasvihuonekaasuista hiilidioksidi (CO<sub>2</sub>), metaani (CH<sub>4</sub>) ja typpioksiduuli (N<sub>2</sub>O). Rehevöittävien päästöjen laskennassa huomioitiin typpi (N) ja fosfori (P) huuhtoumina veteen sekä ammoniakki (NH<sub>3</sub>) ja typenoksidit (NO<sub>x</sub>) ilmaan ja sitä kautta rehevöittäväksi laskeutuneena vesistöön.

**Taulukko 5.** Käytetyt karakterisointikertoimet.

Päästömuuttuja	Ekvivalenttikerroin	Lähde
Ilmastonmuutos	kg CO <sub>2</sub> -ekv./kg	Solomon 2007
CO <sub>2</sub>	1	
CH <sub>4</sub>	23	
N <sub>2</sub> O	296	
Rehevöityminen	kg PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup> -ekv./kg	Seppälä ym., 2004
NH <sub>3</sub> ilmaan	0,35	
NO <sub>x</sub> ilmaan	0,13	
P veteen	3,06	

### 2.4.1. Kierrätyslannoitevalmisteiden valmistuksen päästöt

Kompostin lähtöaineena olivat biokaasuprosessin sivutuote mädäte ja erilliskerätty kotitalousjäte, joten kompostin valmistuksen päästöt kohdistuvat biokaasuprosessiin. Samoin tuhkan valmistuksen päästöt kohdistetaan energiantuotantoon.

Lannoitetehtaan sijoituspaikaksi valittiin kompostointilaitos, joten kompostia ei tarvitse kuljettaa. Tuhka tuodaan laitokselle 5 km päästä, ja se kuljetetaan puoliperävaunurekalla (16–32 tn). Boori lisätään natriumtetraboraattina (Borax) ja sen kuljetusmatkaksi arvioitiin 100 km. Rikkihapon kuljetusmatkaksi arvioitiin 100 km. Typpilisä on mallinnettu ureana, ja sen kuljetusmatkaksi arvioitiin 100 km. Kuljetuksista aiheutuvat päästöt laskettiin GaBi-ohjelmalla käyttäen Ecolnvent-tietokantaa.

Komposti poltettiin 1 MW:n lämpövoimalassa arinakattilassa, jossa apupolttimena toimi maa-kaasupoltin 268 kW keskiteholla. Lämpökäsittely mallinnettiin tehtäväksi samassa kattilassa 65 % teholla, eli 174 kW. Poltossa käytetty kalkki on louhittu Storugnsin louhokselta Gotlannista, ja sen kuljetus on oletettu tapahtuvan autolautalla ja puoliperävaunurekalla (16–32 tn). Kalkin käsittelyn päästöt saatiin Ecolnvent-tietokannasta. Poltossa käytettäväksi puuhakkeeksi valittiin jätepuuhake, joka katsotaan haketettavaksi lähellä lannoitetehtästä (0 km), materiaalin aiheuttamat päästöt saatiin Ecolnvent-tietokannasta. Polttokokeissa syntyvät päästöt mitattiin lämpölaitoksen kattilan savupiipussa olevalla päästömittarilla. Seuraavat ilmapäästöt saatiin mitattua: pienhiukkaset, vesihöyry (H<sub>2</sub>O), hiilidioksidi (CO<sub>2</sub>), hiilimonoksidi (CO), typpioksiduuli (N<sub>2</sub>O), typpimonoksidi (NO), typpidioksidi (NO<sub>2</sub>), rikkidioksidi (SO<sub>2</sub>), ammoniakki (NH<sub>3</sub>), vetykloridi (HCl), vetyfluoridi (HF), metaani (CH<sub>4</sub>), etaani (C<sub>2</sub>H<sub>6</sub>), eteeni (C<sub>2</sub>H<sub>4</sub>), propaani (C<sub>3</sub>H<sub>8</sub>), heksaani (C<sub>6</sub>H<sub>14</sub>), formaldehydi (CH<sub>2</sub>O), kokonaistyyppioksidit ja orgaaninen hiili yhteensä. Lämpökäsittelyssä syntyviä ilmapäästöjä ei saatu mitattua, koska koe jouduttiin keskeyttämään ennen tavoitelämpötilaa.

Rumpusekoittimen teho on 15 kW, briketöintikoneen teho 75 kW ja rakeistuskoneen 46 kW. Laitteistossa käytettävän ruuvikuljettimen teho on 10 kW. Näiden aiheuttamat päästöt vaihtelevat sähköntuotantomenetelmän ja sähkön kulutuksen mukaan. Tässä on käytetty Suomen verkkosähkön tuotannon keskimääräisiä päästöjä vuosina 2015–2019. Laitteiden valmistuksen, kuljetuksen ja asennuksen päästöjä ei huomioitu. Rikkihapon, urean ja natriumtetraboraatin valmistuksen päästöt on saatu Ecolnvent-tietokannasta.

### 2.4.2. Kierrätyslannoitevalmisteiden käytön päästöt

Käytön päästöjen arvioinnissa hyödynnettiin Väättäinen ym. (2011) artikkelissa mitattuja tuloksia. Lannoitetuotteiden kuljetus tehdasvarastolta metsävarastolle (kierrätyslannoitteilla 50 km, väkilannoitteella 200 km) tapahtuu puoliperävaunulla (kantavuus 25 tn), jonka päästöt perustuvat LIPASTO -tietokantaan. Oletuksena on, että lannoitteet kuljetetaan metsävarastolle täydellä kuormalla ja paluukuorma on tyhjä.

Polttoaineen kulutuksen suorat päästöt aiheutuvat lannoitteiden levityksestä joko metsätraktorilla (6 tn) tai helikopterilla. Lisäksi metsätraktori kuljettaa lannoitteen metsävarastolta levityspaikalle 0,5 km matkan. Metsätraktorin polttoaineen kulutuksen litra-kohtaiset päästöt perustuvat LIPASTO -tietokantaan. Kuljetuksissa huomioitiin myös tyhjät kuljetukset metsästä takaisin metsävarastolle. Tuntikohtaiset helikopterin polttoaineen kulutuksen määrät perustuvat asiantuntija-arvioon (taulukko 4) ja päästöt perustuvat Ecolnvent v.3.6 -tietokantaan ja koostuvat lentoaikana kulutetun kerosiinin päästöistä. Kuljetusten ja levityksien polttoainekulutuksen päästöihin on sisällytetty myös polttoaineen valmistuksen ja jakelun päästöt.

Metsän typpilannoituksesta aiheutuvat N<sub>2</sub>O-päästöt arvioidaan lannoitteen kokonaistyyppi-määrään perustuen. Lannoitteesta syntyy metsässä sekä suoria että epäsuoria kaasumaisia N<sub>2</sub>O-päästöjä. Muita mahdollisia, ei lannoiteperäisiä, metsämaan päästöjä ei huomioitu. Suoria kaasumaisia N<sub>2</sub>O-päästöjä muodostuu lannoitteen sisältämästä kokonaistypestä, kun se levitetään maahan. Suorien N<sub>2</sub>O-päästöjen osalta sovellettiin kierrätyslannoitteiden ja väkilannoitteiden tapauksessa kummallakin samaa typpilannoitteen oletuspäästökerrointa 0,01 kg N<sub>2</sub>O-N (per kg lannoitetyppeä) (IPCC 2006). Epäsuoria N<sub>2</sub>O-päästöjä muodostuu lannoitteen ammoniumtyppestä haihtuvasta ammoniakista sekä typen huuhtoumista. Arvioinneissa oletettiin, että kaikki typpeä sisältävät lannoitteet sisälsivät jonkin verran ammoniumtyppeä, josta haihtuu ammoniakkia sekä muodostuu edelleen epäsuoria N<sub>2</sub>O-päästöjä. Kierrätyslannoitteista oletettiin orgaanisten lannoitteiden mukaisesti haihtuvan ilmaan ammoniakkina 0,2 kg typpeä (per kg lannoitetyppeä) ja väkilannoitteesta vastaavasti 0,1 kg typpeä (per kg lannoitetyppeä) (IPCC 2006). Haihtuneesta ammoniakkitypestä 1 % oletettiin muuttuvan N<sub>2</sub>O-typeksi. Myös typen huuhtoumista muodostuu epäsuoria N<sub>2</sub>O-päästöjä ja niitä oletettiin muodostuvan lähes kaikista typpeä sisältävistä lannoitteista. Ainoastaan turvemaiden metsiin metsätraktorilla levitettävien lannoitteiden ei oletettu muodostavan typpihuuhtoumia (vaikka ne sisältäisivätkin typpeä) eikä siten niistä muodostuvia N<sub>2</sub>O-päästöjäkään (ks. seuraavassa kappaleessa tarkemmin rehevöittävät vaikutukset ja niiden arviointi). Arvioissa sovellettiin IPCC (2006) oletuskertoimia. Kierrätys- ja väkilannoitteista oletettiin huuhtoutuvan 0,1 kg typpeä per kg lannoitetyppeä (Finér et al. 2010). Typpihuuhtoumasta muodostuu 0,75 % N<sub>2</sub>O-typeä. Edellä esitetyt oletuskertoimet on vielä muutettu N<sub>2</sub>O-typestä N<sub>2</sub>O-päästökseksi moolimassojen perusteella kertoimella 44/28.

Rehevöittäviä päästöjä muodostuu myös kuljetuksien polttoaineen kulutuksista NH<sub>3</sub> ja NO<sub>x</sub>-päästöjen muodossa ilmaan, jotka laskeumana vesistöön aiheuttaen rehevöitymistä. Rehevöittävästä laskeumasta myös ammoniakki on peräisin lähinnä lannoituksen yhteydessä haihtuvasta typestä ja sitä haihtuu suhteessa enemmän kierrätyslannoitteesta kuin väkilannoitteista.

Kangasmailla väkilannoitteilla tehdyn lannoituksen jälkeen (150 kg N/ha annoksella) mitatut typpihuuhtoumat ovat olleet 12 kg N/ha ensimmäisenä vuonna ja 3 kg N/ha seuraavan vuonna, jonka jälkeen huuhtouma loppuu (Finér et al. 2010). Kierrätyslannoitteiden typpihuuhtoumista ei ole tutkimustietoja, joten sekä referenssilannoitteelle (YaraMila) että kierrätyslannoitteille käytettiin samaa lukua. Erillisiä mittauksia maa- ja lentolevitykselle ei ole saatavilla, joten samaa huuhtouma-arviota 10 % levitetyn typen määrästä käytettiin kaikille lannoitteille ja levitystavoille. Tutkimustuloksia siitä huuhtoutuuko lannoitefosforia kangasmaalta ei ole saatavilla, koska normaalisti kangasmaita ei ole lannoitettu fosforilla.

Turvemailla tuhkan lentolevityksen fosforin huuhtouman on arvioitu olevan keskimäärin 4,5 % kokonaisfosforimäärästä, perustuen keskimääräiseen ojatiheyteen ja empirisiin mittauksiin (Piirainen ym., julkaisematon aineisto). Lentolevityksessä lannoitteen suoraa joutumista ojiin yritetään välttää, mutta varsinkin ojitetuilla turvemailla sarkojen kapeuden takia se on haasteellista. Fosforia oletettiin siis huuhtoutuvan 2 kg P per ha (kun lannoitusmäärä 45 kg/ha) turvemailla lentolevityksen yhteydessä. Tutkimustuloksia siitä huuhtoutuuko lannoitetyppeä turvemaalta ei ole saatavilla, sillä normaalisti turvemaiden metsiä on lannoitettu vain PK-lannoitteilla. Putretti® ja lämpökäsittely komposti sisälsivät kuitenkin typpeä, joten asiantuntija-arvioiden perusteella turvemailla lentolevityksen typpihuuhtoumaksi arvioitiin sama kuin fosforinkin tapauksessa eli 4,5 % lannoitemäärästä. Maalevityksessä metsätraktorilla lannoitteiden joutuminen suoraan ojiin on vältettävissä helpommin. Turvemailla metsätraktorilevityksen fosforin ja typen huuhtouman arvioidaan siten olevan nolla. Tutkimusten mukaan referenssilannoite (RautaPK) turvemailla ei huuhtoudu, sillä rautaa on niin paljon, että se sitoo fosforin hidasliukoiseksi, aivan kuten puutuhkassakin (Nieminen ym. 2011). Typeä RautaPK ei taas sisällä ollenkaan eikä siten typen huuhtoumiakaan synny.

### 3. Tulokset ja tulosten tarkastelu

Lannoitevalmisteiden elinkaariset ilmastovaikutukset esitetään valmistuksen (3.1.) ja käytön osalta (3.2.) sekä lopulta kokonaisuutena elinkaarisina päästölukuina (3.3). Lopuksi vielä erikseen tarkastellaan metsäkäytön rehevöittäviä vaikutuksia (3.4.).

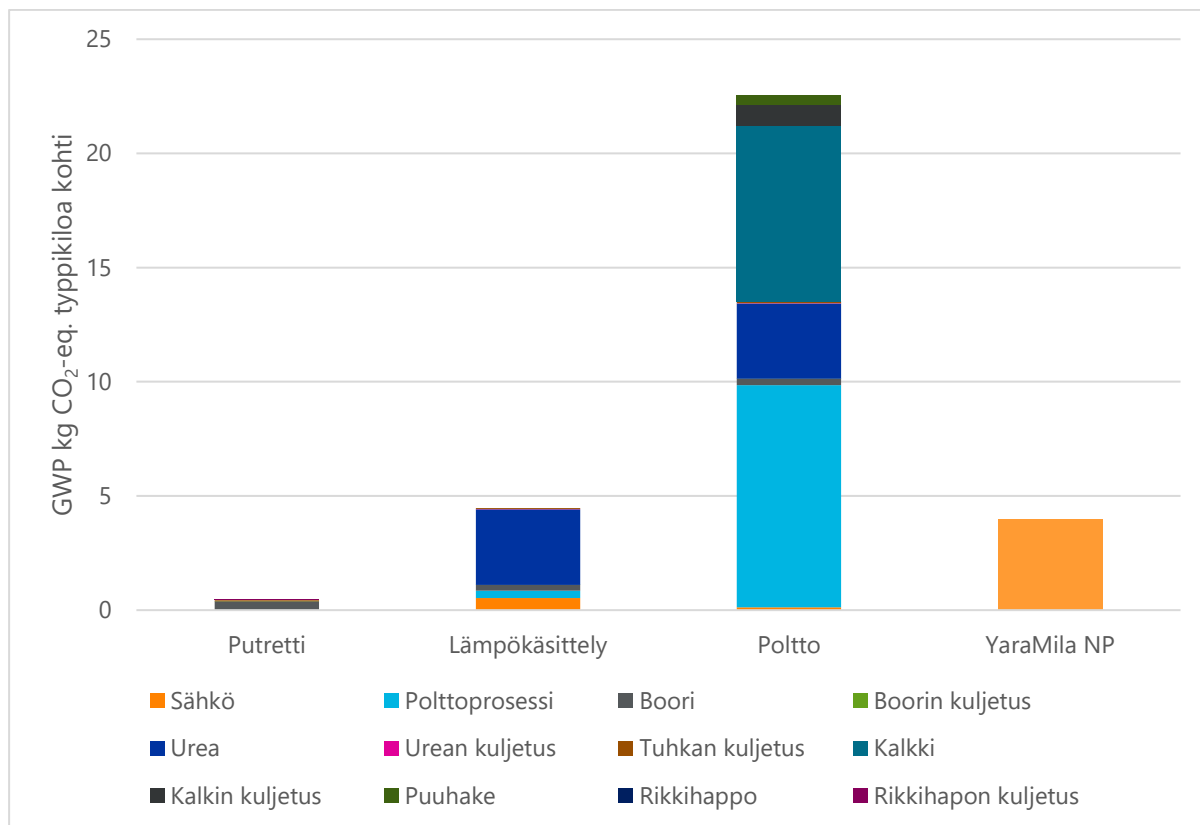
#### 3.1. Lannoitetuotteiden valmistuksen ilmastovaikutukset

##### 3.1.1. Typpilannoitteet

Vertailtavaksi tuotteeksi valittiin YaraMila Metsän NP -lannoite. Valmistuksen osalta kierrätyslannoitteita voidaan vertailla suoraan väkilannoitteen ainoastaan ilmastovaikutuksen osalta, koska lannoitevalmistaja Yara on julkaissut tuotteistaan vain hiilijalanjäljet. Siten tarkasteltavaksi vaikutusluokaksi valittiin vain ilmastovaikutus eli hiilijalanjälki. Rehevöittäviä vaikutuksia ei ole väkilannoitteiden valmistuksesta julkaistu, joten vertailua ei voitu niiden osalta tehdä.

Putretilla® oli pienimmät ilmastovaikutukset valmistuksen osalta (Kuva 5). Sen suurin yksittäinen päästölähde oli natriumtetraboraatin valmistus, missä päästöjä syntyi 0,38 kg CO<sub>2</sub>-ekv. typpikiloa kohden. Tämä kattoi ilmastovaikutuksesta noin 84 %. Seuraavaksi suurin päästölähde oli ammoniakkin talteenotossa käytetyn rikkihapon valmistus 0,029 kg CO<sub>2</sub>-ekv. typpikiloa kohden, jonka osuus kokonaisvaikutuksesta oli noin 6 %. Muut prosessivaiheet ja -kemikaalit aiheuttivat verraten pienen päästön. Putretin® valmistuksen ilmastovaikutus oli noin 12 % vertailukohtana olleen YaraMila Metsän NP -lannoitteen ilmastovaikutuksesta. Kaikki tulokset on koottu Taulukko 6.

Lämpökäsittelyssä suurimman ilmastovaikutuksen aiheuttaa urean lisääminen korvaamaan käsittelyssä hävinnyttä typpeä, 3,3 kg CO<sub>2</sub>-ekv. typpikiloa kohden. Tämän osuus on 74 % valmistuksen koko ilmastovaikutuksesta. Muita suuria päästölähteitä lämpökäsittelyssä ovat sähkön kulutus 0,53 kg CO<sub>2</sub>-ekv. (12 %), maakaasun polttaminen 0,32 kg CO<sub>2</sub>-ekv. (7 %) ja boorilisäys 0,25 kg CO<sub>2</sub>-ekv. (6 %). Käsittelyllä on hieman suurempi (13 %) ilmastovaikutus kuin vertailukohtana olleella YaraMila metsän NP -lannoitteella. Jos typpilisäys jätetään tekemättä, pienee ilmastovaikutus, ollen 29 % verrokkina olleen Yaran tuotteen ilmastovaikutuksesta. Lämpökäsittelyssä vapautuu ilmaan kompostiin sitoutunutta rikkiä. Tämän määrää ja muotoa ei kuitenkaan pystytty määrittelemään kokeissa. On luultavaa, että lämpökäsittelyssä joudutaan hyödyntämään samankaltaista rikin sitomista kuin polttovaihtoehtossakin, joten tässä esitetty ilmastovaikutus ei anna todellista kuvaa lämpökäsittelyn koko ilmastovaikutuksesta. Jos rikin sitomiseen kuluu kalkkia puolet siitä määrästä, mitä polttamisessa kuluu, nousee ilmastovaikutus näille lannoitteille 3,35 kg CO<sub>2</sub>-ekv, mikä nostaa kokonaisilmastovaikutuksen verrokkilannoitetta korkeammaksi kummassakin tapauksessa. Kaikki tulokset on koottu Taulukko 6.



**Kuva 5.** Kierrätysainotteiden ja verrokkina käytetyn väkilannoitteen valmistuksen kasvihuonekaasupäästöt lopputuotteen typpikiloa kohden (kg CO<sub>2</sub>-ekv./kg N).

Poltetun kompostin ja puutuhkan seos aiheuttaa typpilisäyksen kanssa ilmastovaikutuksen, joka on suuruudeltaan 22,5 kg CO<sub>2</sub>-ekv. typpikiloa kohti. Tämä on 5,7-kertainen vaikutus väkilannoitteeseen verrattuna. Poltossa suurimman ilmastovaikutuksen tuottaa maakaasun palaminen ja pienet määrät palamatonta maakaasua. Päästö on 9,74 kg CO<sub>2</sub>-ekv. typpikiloa kohti, mikä vastaa 43 % valmistuksen kokonaispäästöistä. Poltossa vapautuva rikki sidottiin lisäämällä palamisprosessiin polttoaineen syötön yhteydessä kalkkia. Tämä aiheutti 7,71 kg CO<sub>2</sub>-ekv. suuruisen päästön, mikä vastaa 34 % kokonaispäästöistä. Typpilisäys aiheuttaa tässäkin vaihtoehdossa suuren ilmastovaikutuksen, 3,30 kg/CO<sub>2</sub>-ekv. eli 15 % kokonaisvaikutuksesta. Ilman typpilisää ilmastovaikutus on 4,9-kertainen verrokkilannoitteeseen verrattuna. Kaikkien lannoitteiden valmistuksen ilmastovaikutukset on koottu Taulukko 6.

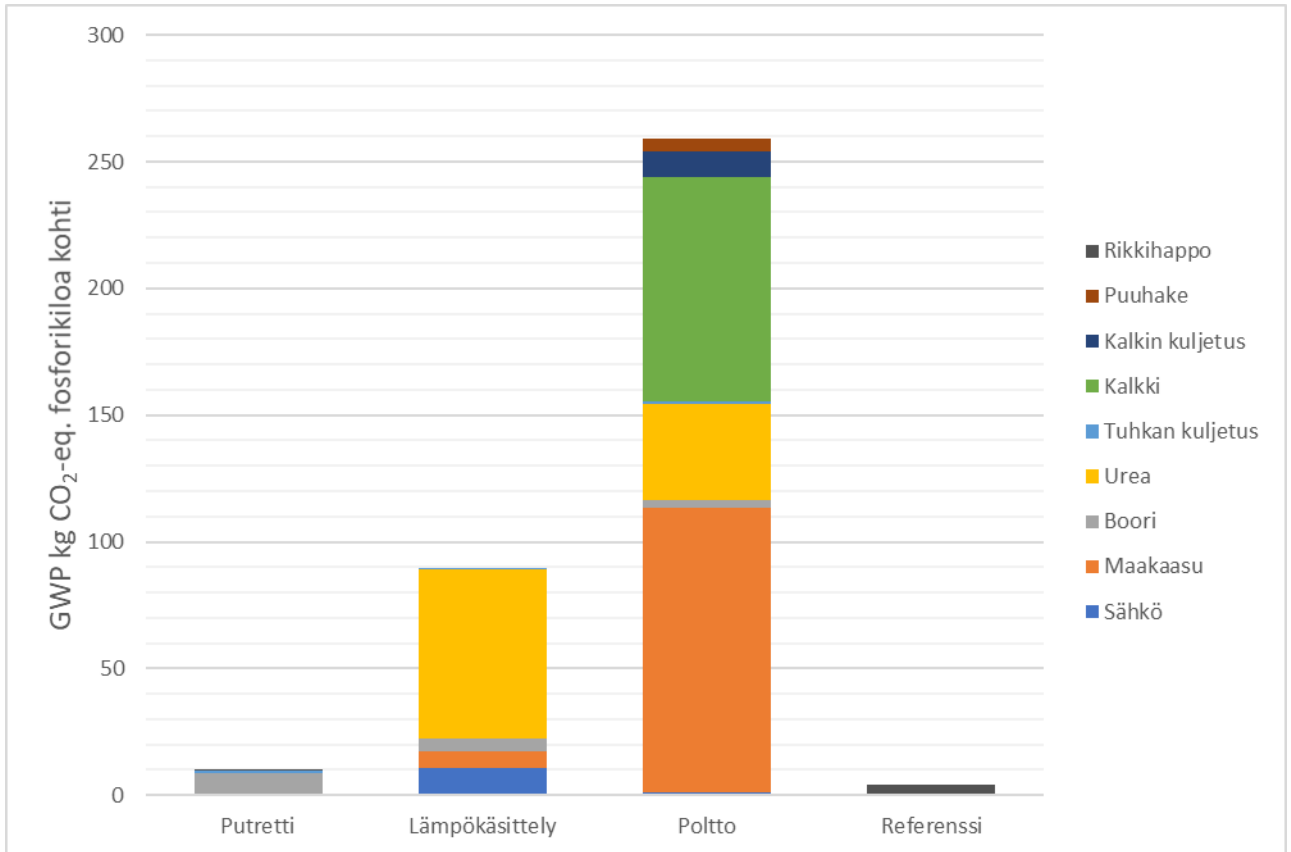
**Taulukko 6.** Lannoitevaihtoehtojen valmistuksen ilmastopäästöt typpikiloa kohti.

Lannoite		Valmistus								Yhteensä
		Sähkö	Poltto/ Lämpökäsittely	Borax	Urea	Rikkihappo	Kalkki	Puuhake	Kuljetukset	
<b>Yksikkö</b>		<b>kg CO<sub>2</sub>-ekv./kg N</b>								
<b>Putretti®</b>		0,0021		0,38		0,029			0,044	<b>0,46</b>
<b>Lämpökäsittely</b>	<b>Ei tyypillisää</b>	0,53	0,32	0,25					0,043	<b>1,14</b>
	<b>Tyypillisä</b>	0,53	0,32	0,25	3,30				0,060	<b>4,46</b>
<b>Poltto</b>	<b>Ei tyypillisää</b>	0,12	9,74	0,28			7,71	0,42	0,96	<b>19,23</b>
	<b>Tyypillisä</b>	0,12	9,74	0,28	3,30		7,71	0,42	0,98	<b>22,54</b>
<b>YaraMila Metsän NP</b>										<b>3,96</b>



### 3.1.2. Fosforilannoitteet

Kierrätyslannoitteista Putretilla® oli pienimmät valmistuksen päästöt (Kuva 6). Lämpökäsitellyn ja poltetun kompostin valmistuksen päästöt nousivat huomattavasti suuremmiksi johtuen niiden valmistuksen useista prosessivaiheista (ks. 3.2.1.) siitäkin huolimatta, että typpilisäystä ei fosforilannoitteiden osalta tehty. Lämpökäsitellyn ja poltetun kompostin fosforipitoisuus oli myös pienempi kuin Putretin®, jolloin fosforikiloa kohden muodostui suuremmat päästöt.



**Kuva 6.** Kierrätyslannoitteiden valmistuksen kasvihuonekaasupäästöt lopputuotteet fosforikiloa kohden (kg CO<sub>2</sub> -ekv./kg P).

Vertailtavaksi tuotteeksi valittiin suometsissä aikaisemmin käytetty RautaPK -lannoite. Sen valmistus on kuitenkin jo lopetettu, eikä sen valmistuksen päästöistä löytynyt tietoa. Erot RautaPK:n ja kierrätyslannoitteiden valmistuksen ilmastovaikutuksissa voivat kuitenkin olla merkittäviä. Referenssinä päädyttiin tarkastelemaan Ecoinvent v3.6 tietokannan pelkän epäorgaanisen PK -lannoitteen valmistuksen ilmastovaikutusta, joka on 1,89 kg CO<sub>2</sub> ekv. per P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> eli 4,33 kg CO<sub>2</sub> ekv per fosforikilo (Phosphate fertiliser, as P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> {GLO}) market for | APOS, U). Tästä näkökulmasta väkilannoitteen valmistuksen päästöt ovat huomattavasti pienemmät kuin lämpökäsitellyn (89,9 kg CO<sub>2</sub> ekv. per kg P) ja poltetun (259,0 kg CO<sub>2</sub> ekv. per kg P) kierrätyslannoitteiden valmistuksen päästöt. Myös Putretin® valmistuksen päästöt (10,2 kg CO<sub>2</sub> ekv. per kg P) fosforikiloa kohden ylittävät väkilannoitteen päästöt.

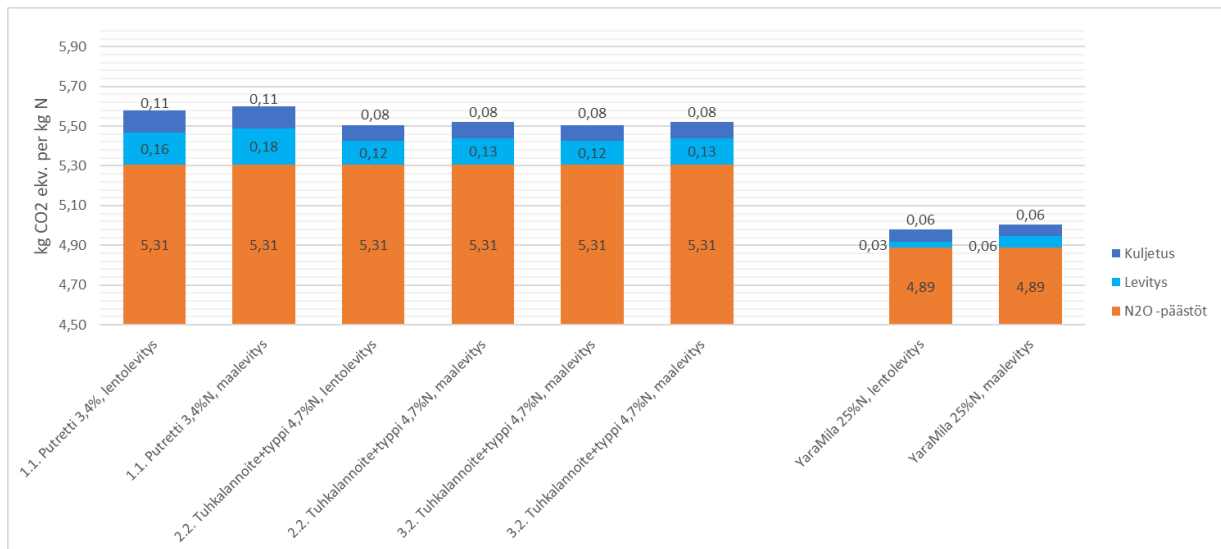
## 3.2. Lannoitustuotteiden metsäkäytön ilmastovaikutukset

Kaikkien kierrätyslannoitevalmisteiden käytön ilmastovaikutukset olivat suuremmat kuin referensseiksi valitun väkilannoitteen käytön päästöt. Erot vaikutuksissa johtuivat väkilannoitteiden suuremmista ravinnepitoisuuksista seuranneesta pienemmästä kuljetustarpeesta ja hehtaari-kohtaisesta levitystarpeesta (1 tn/ha) kuin kierrätyslannoitteilla (4–5 tn/ha) sekä väkilannoitteen pienemmästä epäsuorien N<sub>2</sub>O päästöjen kertoimesta.

### 3.2.1. Typpilannoitteet kangasmaiden metsissä

Tulosten mukaan (Kuva 7, 0) kierrätyslannoitteiden käytön ilmastovaikutukset olivat vain hieman suuremmat kuin referenssiksi valitulla väkilannoitteella. Suurin ilmastovaikutus kaikilla lannoitteilla syntyy lannoitteen N<sub>2</sub>O -päästöistä. Suorat N<sub>2</sub>O -päästöt ovat kaikilla yhtä suuret typpikiloa kohden, mutta epäsuorien N<sub>2</sub>O -päästöjen päästökerroin väkilannoitteiden osalta on pienempi (IPCC 2006) kuin kierrätyslannoitteiden. Näitä epäsuoria N<sub>2</sub>O -päästöjä muodostuu lannoitteiden ammoniakki- ja typpihuuhtoumista (ks. laskentamenetelmät). Myös väkilannoitteen huomattavasti suurempi typpipitoisuus lisää hieman ilmastohyötyjä, sillä niiden levitys on huomattavasti tehokkaampaa (ks. taulukko 4) ja myös metsään kuljetettavat lannoitemäärät ovat pienempiä. Lannoitteen typpipitoisuuden vaikutus on kuitenkin pieni verrattuna N<sub>2</sub>O -päästöjen vaikutukseen.

Verrattaessa kierrätyslannoitteita keskenään, eivät ne eronneet juurikaan toisistaan käytön päästöjen osalta. Putretti® -lannoitteen alhaisempi typpipitoisuus lisää levityksen ja kuljetuksen päästöjä tuottaen hieman suuremman ilmastovaikutuksen kuin lämpökäsitellyllä ja poltetulla komposti-puutuhka -seoslannoitteella (typpilisällä 2.2. ja 3.2.). N<sub>2</sub>O -päästöt olivat kaikilla kierrätyslannoitteilla samat typpikiloa kohden.



**Kuva 7.** Kierrätyslannoitteiden ja kaupallisen väkilannoitteen metsäkäytön kasvihuonekaasupäästöt ketjuvaiheittain ja lopputuotteen typpikiloa kohden (kg CO<sub>2</sub>-ekv./kg N).

**Taulukko 7.** Typpilannoitteiden elinkaariset ilmastovaikutukset (kg CO<sub>2</sub>-ekv./kg N) ketjuvaiheittain, H=helikopterilevitys, M=metsätraktorilevitys.

Lannoite			Käyttö			Yhteensä
Vaiheet			Kuljetus	Levitys	Lannoitteen N <sub>2</sub> O-päästöt	
Yksikkö			kg CO <sub>2</sub> -ekv. /kgN	kg CO <sub>2</sub> -ekv. /kgN	kg CO <sub>2</sub> -ekv. /kgN	kg CO <sub>2</sub> -ekv. /kgN
<b>Käsittlemätön komposti ja puutuhka (Putretti®)</b>	1.0.	H	0,11	0,16	5,31	<b>5,58</b>
		M	0,11	0,18	5,31	<b>5,60</b>
<b>Lämpökäsitelty komposti ja puutuhka (typpilisällä)</b>	2.2.	H	0,08	0,12	5,31	<b>5,51</b>
		M	0,08	0,13	5,31	<b>5,52</b>
<b>Poltettu komposti ja puutuhka (typpilisällä)</b>	3.2.	H	0,08	0,12	5,31	<b>5,51</b>
		M	0,08	0,13	5,31	<b>5,52</b>
<b>YaraMila NP -lannoite</b>	R1	H	0,06	0,03	4,89	<b>4,98</b>
		M	0,06	0,06	4,89	<b>5,01</b>

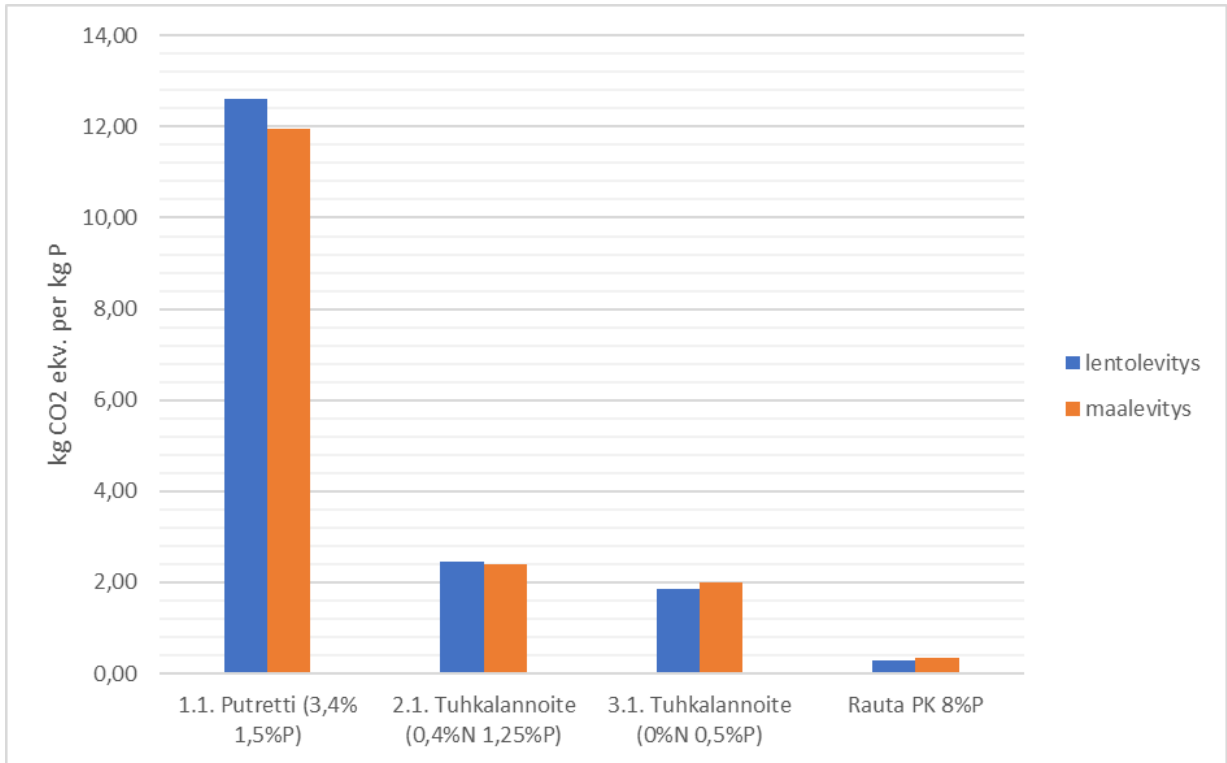
### 3.2.2. Fosforilannoitteet turvemaiden metsissä

Tulosten mukaan fosforin täydennykseen käytettävien kierrätyslannoitteiden ilmastovaikutus fosforikiloa kohden olivat suuremmat kuin väkilannoitteen (RautaPK) (Kuva 8, Taulukko 9). Tämä johtuu pääasiassa siitä, että väkilannoite ei sisällä fosforikiloa kohden yhtään typpeä eikä siten muodosta merkittäviä N<sub>2</sub>O-päästöjä. Päästöjä muodostuu kuitenkin kuljetusten ja levitysten polttoainekulutuksista.

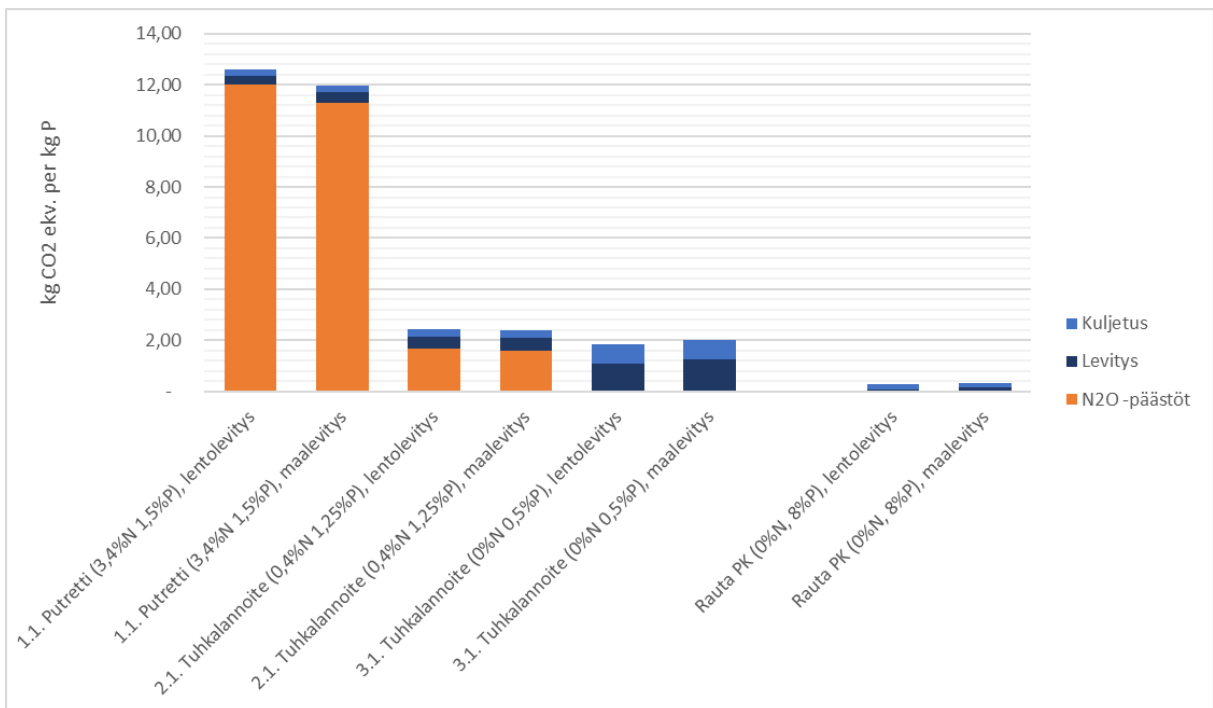
Väkilannoitteen fosforipitoisuus on suurempi (8 %) kuin kierrätyslannoitteiden eli kierrätyslannoitteita joudutaan kuljettamaan ja levittämään enemmän, mikä aiheuttaa suuremmat polttoaineen kulutuksen päästöt kuljetuksista ja levityksestä. Poltettu komposti (3.1.) ei myöskään sisällä typpeä, mutta sen päästöt ovat väkilannoitetta hieman suuremmat johtuen suuremmista kuljetusten ja levitysten päästöistä fosforikiloa kohden. Väkilannoitetta oletettiin tosin kuljetettavan hieman kauempaa (200 km) kuin kierrätyslannoitteita (50 km), mutta pidempi etäisyys ei riittänyt nostamaan sen kuljetusten päästöjä korkeammaksi kuin kierrätyslannoitteiden.

Lämpökäsitelty komposti (2.1.) sisältää hieman typpeä (0,4 %) muodostaen jo hieman N<sub>2</sub>O-päästöjä fosforikiloa kohden. Päästöt eivät ole paljoa suurempia kuin poltetun kompostin (3.1.), koska lämpökäsitellyn kompostin fosforipitoisuus on korkeampi johtaen pienempiin kuljetusten ja levitysten päästöihin.

Putretissa® on jäljellä lähes kaikki kompostin typpi, joten käytön kasvihuonekaasupäästöt ovat lannoitteista selvästi suurimmat. Lentolevitys kasvattaa päästöjä entisestään typpeä sisältävien lannoitteiden (1.0 ja 2.1.) tapauksessa sillä turvemaalla lentolevityksen aikana muodostuu typen huuhtoumia ja typen huuhtoumista muodostuvia epäsuoria N<sub>2</sub>O-päästöjä (ks. kuva 9). Lannoitteet, jotka eivät sisällä typpeä ollenkaan (3.1. ja Rauta PK) eivät muodosta lentolevityksen myötä huuhtoumia ja epäsuoria N<sub>2</sub>O-päästöjä.



**Kuva 8.** Kierrätyslannoitteiden ja kaupallisen väkilannoitteen käytön kasvihuonekaasupäästöt lopputuotteen fosforikiloa kohden (kg CO<sub>2</sub>-ekv./kg P).



**Kuva 9.** Kierrätyslannoitteiden ja kaupallisen väkilannoitteen käytön kasvihuonekaasupäästöt lopputuotteen fosforikiloa kohden (kg CO<sub>2</sub>-ekv./kg P) päästölähteittäin.

**Taulukko 8.** Fosforilannoitteiden elinkaariset ilmastovaikutukset (kg CO<sub>2</sub>-ekv./kg P) ketjuvaiheittain, H=helikopterilevitys, M= metsätraktorilevitys.

Lannoite		Levitys-tapa	Käyttö			Yhteensä
			Kuljetus kg CO <sub>2</sub> - ekv./kg P	Levitys kg CO <sub>2</sub> - ekv./kg P	Käytön N <sub>2</sub> O -päästöt kg CO <sub>2</sub> - ekv./kg P	kg CO <sub>2</sub> - ekv./kg P
Käsittelemätön komposti ja puutuhka (Putretti®)	1.0.	H	0,25	0,37	13,40	<b>12,61</b>
		M	0,25	0,42	11,29	<b>11,96</b>
Lämpökäsitelty komposti ja puutuhka (ilman tyypilisää)	2.1.	H	0,30	0,44	1,90	<b>2,44</b>
		M	0,30	0,50	1,60	<b>2,40</b>
Poltettu komposti ja puutuhka (ilman tyypilisää)	3.1.	H	0,76	1,10	0,00	<b>1,86</b>
		M	0,76	1,25	0,00	<b>2,01</b>
Rauta PK -lannoite	R2	H	0,19	0,09	0,00	<b>0,28</b>
		M	0,19	0,15	0,00	<b>0,34</b>

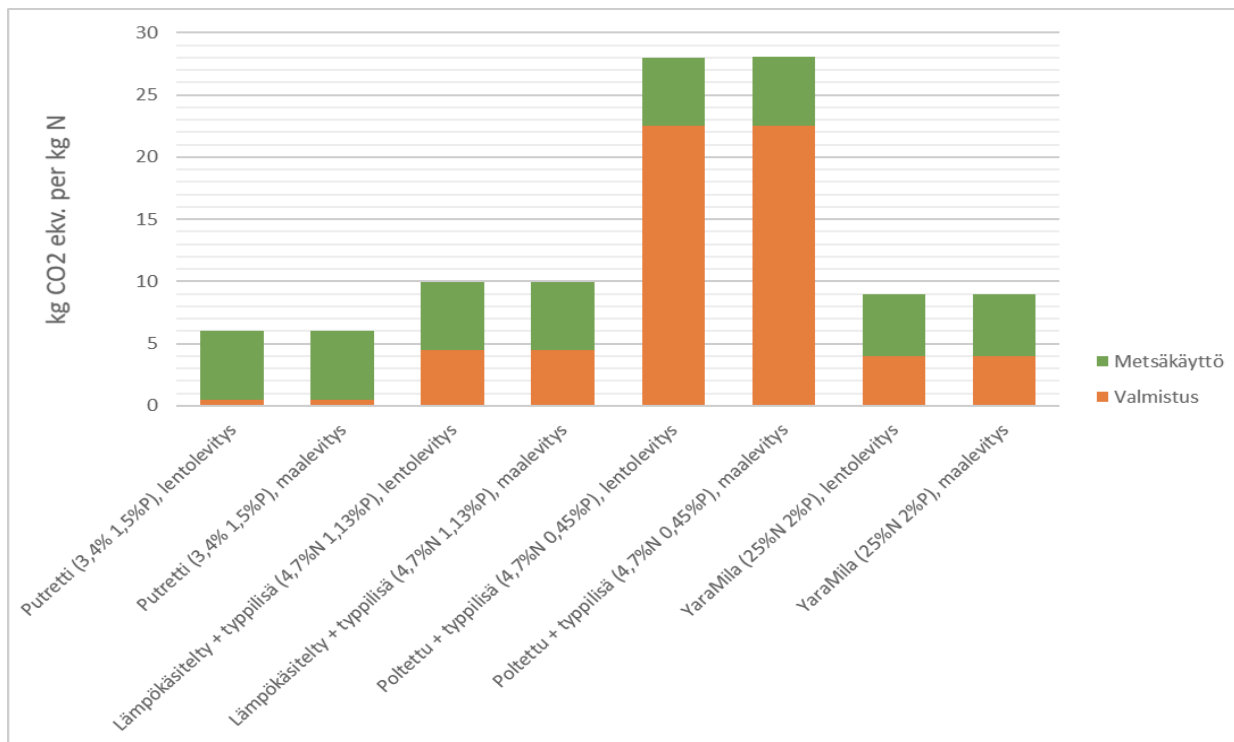
Poltetun komposti-puutuhkan osalta on kuitenkin huomioitava, että levitysskenaariossa tavoiteltu fosforimäärä on vain kolmannes (25 kg/ha) väkilannoitteen tavoitteesta (80 kg/ha). Saman kasvuvaikutuksen savuttamiseksi kuljetuksen ja levityksen päästöt moninkertaistuvat taulukossa 9 esitetystä. Lämpökäsitellyllä komposti-tuhkalannoitteella tavoitemäärä oli 62,5 kg/ha, joten sama kasvuvaikutus voitaisiin saavuttaa karkeasti saman kokoluokan ilmastovaikutuksilla.

### 3.3. Lannoitetuotteiden elinkaariset ilmastovaikutukset

Ilmastovaikutusten osalta tässä osiossa tarkastellaan typpi- sekä fosforilannoitteiden elinkaarisia vaikutuksia eli valmistuksen ja metsäkäytön aikaisia vaikutuksia yhdessä.

#### 3.3.1. Typpilannoitteet

Vaikutusarvioinnin (Kuva 10, Taulukko 9) mukaan voidaan todeta, että Putretti® -lannoitteella on typpilannoitevaihtoehdoista pienimmät ilmastovaikutukset kangasmailla. Tämä johtuu erityisesti Putretin® valmistuksen merkittävästi pienemmistä kasvihuonekaasupäästöistä. Käytön päästöt ovat jokaisen lannoitetuotteen osalta lähes samat ja hieman pienemmät väkilannoitteella.



**Kuva 10.** Kierrätysainotteiden ja väkilannoitteiden elinkaariset kasvihuonekaasupäästöt lopputuotteen tyypikiloa kohden (kg CO<sub>2</sub>-ekv./kg N).

**Taulukko 9.** Typpilannoitteiden elinkaariset ympäristövaikutukset (kg CO<sub>2</sub>-ekv./kg N). H=helikopterilevitys, M=metsätraktorilevitys.

	Lannoite		Levitystapa	Valmistus	Käyttö	Yhteensä
				kg CO <sub>2</sub> -ekv./kg N	kg CO <sub>2</sub> -ekv./kg N	kg CO <sub>2</sub> -ekv./kg N
1	Käsittelemätön komposti ja puutuhka (Putretti®)	1.0.	H	0,45	5,58	6,03
			M	0,45	5,60	6,05
2	Lämpökäsitelty komposti ja puutuhka (tyypillisällä)	2.2.	H	4,45	5,51	9,96
			M	4,45	5,52	9,97
3	Poltettu komposti ja puutuhka (tyypillisällä)	3.2.	H	22,52	5,51	28,03
			M	22,52	5,52	28,04
R1	YaraMila NP -lannoite	R1	H	3,96	4,98	8,94
			M	3,96	5,01	8,97

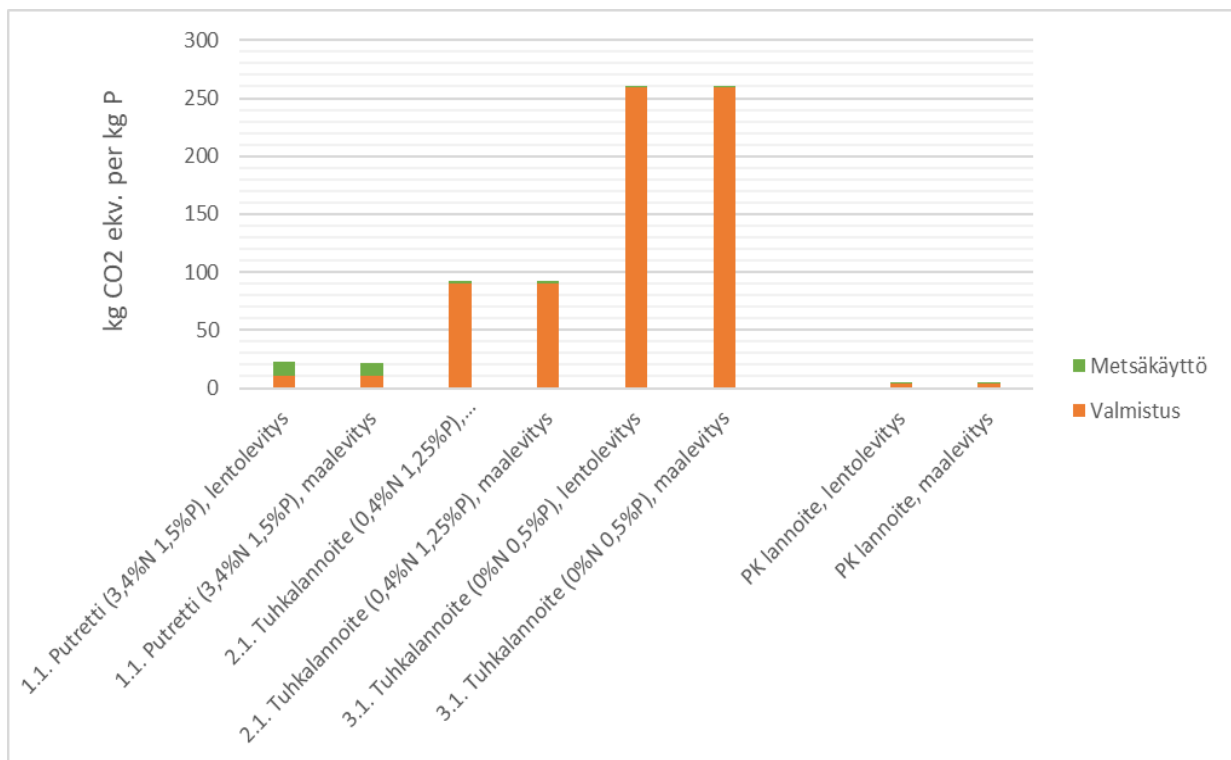
Edellä olevat ilmastovaikutukset on esitetty levitettävää tyypikiloa kohden. Jos oletuksena olisi, että lannoitteesta riippumatta saataisiin sama metsänkasvu aikaiseksi samalla typpimäärällä hehtaari kohden, lannoituksen lopullinen hehtaarikohtainen ilmastovaikutus saataisiin laske-  
malla yhteen valmistuksen ja käytön elinkaariset päästöt ja kertomalla luku valitulla typen levi-  
tysmäärällä. Käytännössä levitettävän typen määrät vaihtelevat eri lannoitteiden välillä. Lähtö-  
tiedoissa oletettiin, että levitysmäärät ovat 170 kg N/ha (Putretti®), 200 kg N/ha (lämpökäsi-  
telty ja poltettu) ja 250 kg N/ha (väkilannoite). Näiden vaikutus on otettu huomioon vertailu-  
laskelmissa. Jos esimerkiksi Putrettia® levitetään enemmän kuin 170 kg N/ha, myös sen ilmas-  
tovaikutus tyypikiloa kohden nousee, ei tosin samassa suhteessa, sillä muutos kohdistuu vain



levityksen ja kuljetuksen aiheuttamiin päästöihin 0,27 kg CO<sub>2</sub>-ekv. Se muodostaa vain 4,1 % Putretin® yhteenlasketuista 6,65 kg CO<sub>2</sub>-ekv. ilmastovaikutuksista. Vaikka Putretin® levitysmäärä hehtaaria kohden nostettaisiin typen määrällä mitattuna samalle tasolle kuin väkilannoitteilla, sen ilmastovaikutus jää selvästi väkilannoitusta pienemmäksi hehtaarikohtaisesti.

### 3.3.2. Fosforilannoitteet

Turvemailla väkilannoitteena käytetyn RautaPK-lannoitteen valmistuksen päästöistä ei löytynyt tietoa, joten käytimme Ecoinvent v3.6 tietokannan pelkän epäorgaanisen PK -lannoitteen (Phosphate fertiliser, as P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> {GLO}| market for | APOS, U) valmistuksen ilmastovaikutustietoa 4,33 kg CO<sub>2</sub> ekv per kg P valmistuksen osalta referenssiksi (ks. 3.1.2.). Tämä on merkittävästi pienempi kuin lämpökäsittelyn ja poltetun kierrätyslannoitteen valmistuksen päästöt (Kuva 11). RautaPK:lla on todennäköisesti raudan lisäämisen takia hieman suurempi ilmastopäästö, joten tulos on suuntaa antava. Metsäkäytön päästöt laskettiin RautaPK-lannoitteelle (ks. 3.2.2). Väkilannoitteen elinkaarin ilmastovaikutus jää merkittävästi pienemmäksi kuin kierrätyslannoitteiden (myös Putretin®), sillä sen valmistuksen ja käytön päästöt fosforikiloa kohden ovat huomattavasti pienemmät mm. työttömyydestä ja korkeasta fosforipitoisuudesta johtuen (Kuva 11).



**Kuva 11.** Kierrätyslannoitteiden ja kaupallisen väkilannoitteen käytön kasvihuonekaasupäästöt lopputuotteen fosforikiloa kohden (kg CO<sub>2</sub>-ekv./kg P) päästölähteittäin.

### 3.4. Lannoitetuotteiden metsäkäytön rehevöittävät vaikutukset

Rehevöittävästä vaikutuksista lannoitteiden valmistuksen osalta ei löytynyt tietoa. Metsäkäytön osalta pystyttiin kuitenkin arvioimaan ilmasto- ja rehevöittävät vaikutukset väki- ja kierrätyslannoitevalmisteiden osalta, niiden typpi- ja fosforipitoisuuksien mukaisesti, mutta se ei yksinään riitä elinkaaristen vaikutusten laskentaan.

#### 3.4.1. Typpilannoitteet kangasmaiden metsissä

Kokonaisuudessaan kierrätyslannoitevalmisteiden ja väkilannoitteen rehevöittävät vaikutukset olivat keskenään samaa luokkaa (Taulukko 10). Mittayksikkönä on kokonaisfosforin määrä levitettyä typpikiloa kohden ( $\text{g PO}_4^{3-}\text{-ekv. /kg N}$ ). Kangasmailla oletuksena oli, että fosforia ei huuhtoudu lannoitteista ollenkaan (ks. 2.4.2). Rehevöittävässä vaikutuksessa on neljä komponenttia: kuljetuksen, levityksen ja lannoitteen laskeumat, sekä typen huuhtoumat vesistöön. Näistä typen huuhtoumat vesistöön ovat selvästi suurin komponentti ja yhtä suuri kaikille lannoitteille ( $42 \text{ g PO}_4^{3-}\text{-ekv. /kg N}$ ). Toiseksi suurin komponentti on lannoiteperäinen  $\text{N}_2\text{O}$  laskema vesistöihin. Orgaanisille lannoitteille tämä on kaikille yhtä suuri ( $6,04 \text{ g PO}_4^{3-}\text{-ekv. /kg N}$ ) mutta epäorgaanisille 7 % pienempi ( $5,62 \text{ g PO}_4^{3-}\text{-ekv. /kg N}$ ) johtuen pienemmästä päästökertoimesta (IPCC 2006). Levitettyä typpikiloa kohden tämä on merkittävin ero lannoitteiden välillä, sillä kuljetuksen ja levityksen rehevöittävät vaikutukset vaihtelevat välillä  $0,02\text{--}0,11 \text{ g PO}_4^{3-}\text{-ekv. /kg N}$ . Erot kuljetusten välillä syntyvät lannoitteiden typpipitoisuuksista. Helikopterilevityksen laskeuma on noin kaksinkertainen metsälevitykseen nähden. Käytännössä nämä erot kuitenkin häipyvät peittyvät lannoiteperäisten laskeumien ja huuhtoutumien alle. Oletuksena oli myös, että typpihuuhtoumat ovat lento- että maalevityksen tapauksessa eli siten rehevöittävien vaikutusten näkökulmasta ei ole merkitystä tapahtuuko typpilannoitteen levitys metsätraktorilla vai helikopterilla.

#### 3.4.2. Fosforilannoitteet turvemaiden metsissä

Putretti® -lannoitteen rehevöittävät vaikutukset turvemaalla olivat fosforikiloa kohden selkeästi suuremmat kuin muiden lannoitteiden (Kuva 11). Tämä johtuu Putretin® suuremmasta typpipitoisuudesta ja vastaavasti suuremmasta typen huuhtoumasta lentolevityksessä. Maalevityksessä typpi ja fosforihuuhtoumia ei katsota syntyvän ollenkaan. Maalevityksessä rehevöittäviä vaikutuksia syntyy kuitenkin Putretin® sisältämän typen  $\text{N}_2\text{O}$  laskeumista. Tämän lisäksi rehevöittäviä vaikutuksia muodostuu vielä kuljetusten ja levitysten polttoainekulutuksien laskeumista.

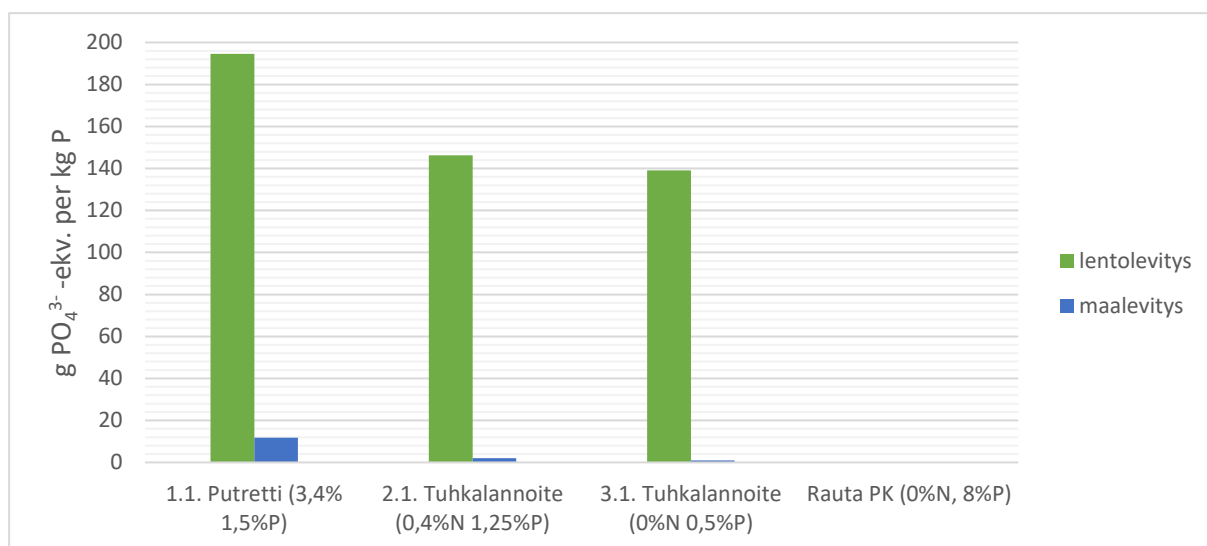
Kaikilla kierrätyslannoitteilla rehevöittävät vaikutukset olivat suuremmat kuin verrokkina olleella RautaPK -lannoitteella (Kuva 12). Tämä johtuu siitä, että RautaPK -lannoite ei sisällä typpeä eikä siten muodosta typen huuhtoumia eikä  $\text{N}_2\text{O}$  -päästöistä rehevöittäviä laskeumia. Tämän lisäksi sen ei katsota sisältävänsä raudan takia muodostavan fosforihuuhtoumia ollenkaan. Siten sen päästöt johtuvat ainoastaan suhteellisen pienistä kuljetusten ja levitysten polttoainekulutuksen rehevöittävästä laskeumista (Taulukko 11). Poltettu komposti (3.1.) ei myöskään sisällä typpeä, eikä siten aiheuta typen huuhtoumia. Silti sen rehevöittävä vaikutus fosforikiloa kohden on hieman suurempi kuin väkilannoitteen (RautaPK), koska väkilannoitteen fosforipitoisuus on korkeampi ja siten sen päästöt kohdistetaan suuremmalle fosforimäärälle jotta pienempiin fosforikilo kohtaisiin päästöihin.

**Taulukko 10.** Typpilannoitteiden rehevöittävät vaikutukset (g PO<sub>4</sub><sup>3-</sup>-ekv./kg N) ketjuvaiheittain, H= helikopterilevitys, M=metsätraktorilevitys.

Lannoite			Käyttö				Yhteensä	
Laskeuma/huuhdonta			Laskeumat (kuljetus)	Laskeumat (levitys)	Laskeuma (N <sub>2</sub> O-päästöt)	N-huuhdonta		
Yksikkö			g PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup> -ekv./kg N	g PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup> -ekv./kg N	g PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup> -ekv./kg N		g PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup> -ekv./kg N	
1	Putretti®: Käsittelemätön komposti ja puutuhka	1.0.	H	0,10	0,11	6,04	42,00	<b>48,25</b>
			M	0,10	0,05	6,04	42,00	<b>48,19</b>
2	Lämpökäsitelty komposti ja puutuhka (typpilisällä)	2.2.	H	0,07	0,08	6,04	42,00	<b>48,19</b>
			M	0,07	0,04	6,04	42,00	<b>48,15</b>
3	Poltettu komposti ja puutuhka (typpilisällä)	3.2.	H	0,07	0,08	6,04	42,00	<b>48,19</b>
			M	0,07	0,04	6,04	42,00	<b>48,15</b>
R1	YaraMila NP -lannoite		H	0,05	0,02	5,62	42,00	<b>47,69</b>
			M	0,05	0,02	5,62	42,00	<b>47,69</b>

Lentolevityksen rehevöittävä vaikutus on huomattavasti suurempi kierrätyslannoitteilla sillä maalevityksessä (metsätraktorilla) ei lannoitteita joudu suoraan ojiin. Kierrätyslannoitteiden rehevöittävät vaikutukset syntyvät maalevityksessä vain kuljetusten ja levitysten pakokaasupäästöjen laskeumista. Kierrätyslannoitteiden alhaisemmasta fosforipitoisuudesta johtuen, kuljetuskertoja vaaditaan enemmän ja levityksen tehokkuus on alhaisempi.

Lentolevityksen tapauksessa kierrätyslannoitteista muodostuu pakokaasupäästöjen laskeumien lisäksi vielä typen ja fosforin huuhtoumia vesistöön. Lentolevityksen tapauksessa fosforihuuhdonta oli kaikilla kierrätyslannoitteilla sama (4,5%) fosforikiloa kohden. Erot kierrätyslannoitteiden välillä syntyvät vain niiden sisältämän typen määrästä ja sen huuhtoumista.

**Kuva 13.** Kierrätyslannoitteiden ja kaupallisen väkilannoitteen käytön rehevöittävät vaikutukset lopputuotteen fosforikiloa kohden (g PO<sub>4</sub><sup>3-</sup>-ekv./kg P) päästölähteittäin.

Lentolevityksen rehevöittävät vaikutukset olivat huomattavasti suuremmat kuin maalevityksen. Esimerkiksi Putretti® -lannoitteen rehevöittävät vaikutukset turvemaalla olivat fosforikiloa kohden lentolevityksessä jopa 194,5 ja maalevityksessä vain 11,8 g PO<sub>4</sub><sup>3-</sup>-ekv./kg P. Maalevityksessäkin voi syntyä huuhtoumia, joita ei tässä tutkimuksessa, tutkitun tiedon puutteesta johtuen otettu huomioon. Siitä huolimatta Putretin® rehevöittävä vaikutus verrattuna muihin kierrätyslannoitetuotteisiin on huomattavasti suurempi (Kuva 12, Taulukko 11).

**Taulukko 11.** Fosforilannoitteiden rehevöittävät vaikutukset (g PO<sub>4</sub><sup>3-</sup>-ekv./kg P) ketjuvaiheittain, H= helikopterilevitys, M=metsätraktorilevitys.

Lannoite		Levitystapa	Käyttö			Huuhtouma	Yhteensä
			Laskeuma (kuljetus)	Laskeuma (levitys)	Laskeuma (N <sub>2</sub> O-päästöistä)		
Yksikkö			g PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup> -ekv./kg P				
Käsittelemätön komposti ja puutuhka (Putretti®)	1.1.	H	0,2	0,2	13,7	180,4	<b>194,5</b>
		M	0,2	0,1	11,5	0,0	<b>11,8</b>
Lämpökäsitelty komposti ja puutuhka (typipilisällä)	2.1.	H	0,3	0,3	1,9	143,7	<b>146,2</b>
		M	0,3	0,1	1,6	0,0	<b>2,0</b>
Poltettu komposti ja puutuhka	3.1.	H	0,7	0,7	0,0	137,7	<b>139,1</b>
		M	0,7	0,4	0,0	0,0	<b>1,0</b>
RautaPK	R1	H	0,16	0,06	0,00	0,00	<b>0,22</b>
		M	0,16	0,04	0,00	0,00	<b>0,21</b>

## 4. Johtopäätökset ja jatkotutkimustarpeet

Metsälannoitukseen sopivien kierrätyslannoitteiden valmistusprosessit ovat vielä konseptivaiheessa ja tässä tutkimuksessa selviteltiin valittujen esimerkkilannoitteiden päästöjä. Laskelmien tuloksia ei tule pitää tarkkoina vertailulukuina, vaan implikaationa siitä, missä prosessivaiheissa päästöt syntyvät ja minkälaiset koostumukset niillä voisi olla. Koska kierrätyslannoitteet valmistetaan nollapäästöisistä jätteinä käsiteltävistä raaka-aineista, niiden valmistus johtaa yleensä pieniin päästöihin verrattuna kaupallisiin lannoitteisiin. Tässä tutkimuksessa päästöjen syntyä minimoitiin myös valitsemalla kierrätyslannoitteiden raaka-aineiksi paikallisia sivuvirtoja, jolloin niiden kuljetuksesta ei syntynyt päästöjä. Paikallisuus kuitenkin määrittelee myös lannoitteen ravinnepitoisuuden ja olisi tärkeä tutkia, miten kaukaa erilaisia sivuvirtoja on päästönäkökulmasta järkevää kuljettaa.

Tutkimus osoitti, että kierrätyslannoitteiden raaka-aineiden erilaiset prosessoinnit voivat synnyttää päästöjä, jotka lisäävät niiden päästökuormaa merkittävästi. Tutkimuksessa haitta-aineiden poisto lämpö- ja polttokäsittelyillä ja prosessoinnissa menetetyntypen korvaaminen urealla eivät olleet päästönäkökulmasta järkeviä toimenpiteitä. Putretin® valmistuksessa energiankulutus on valmistuksessa vähäistä, koska siinä ei tarvita lämpöä. Esimerkiksi kompostin poltossa tarvittava tukipolttoaine ja rikin sitomiseen käytetty kalkki lisäävät huomattavasti kasvihuonekaasupäästöjä, joita tässä tutkimuksessa nimitetään ilmastovaikutuksiksi. Muita ravinteitä kuin booria ei Putretin® valmistuksessa tarvita, koska lähtöaineet sisältävät runsaasti ravinteita. Elinkaarinäkökulmasta vaikuttaisi siltä, että Putretti®-lannoite onkin ilmastovaikutuksen näkökulmasta kannattavin vaihtoehto kangasmetsien typpilannoituksiin. Jos booria ei ole tarpeen lisätä, sen valmistuksen ilmastovaikutus pienenee edelleen. Toinen vaihtoehto on löytää lisättäville ravinteille, esimerkiksi boorille tai prosessoinneissa menetetylle tyypelle, ilmastokestävämpi vaihtoehto. Kun kierrätyslannoitteita tehdään paikallisista raaka-aineista ja sivuvirroista, joudutaan prosessointihaasteet ratkaisemaan tapauskohtaisesti.

Tutkimus osoitti myös sen, että kierrätyslannoitteiden pieni ja osin vääränlainen ravinnekoostumus lisäävät päästöjä. Tämä johtui kuljetus- ja levityskertojen lisääntymisestä, mikä kasvattaa koneiden ja ajoneuvojen päästöjä ilmaan ja nostaa niiden käytön päästöt suuremmiksi väkilannoitteisiin verrattuna. Kuljetusten ja levitysten päästöt olivat kuitenkin pienet suhteessa lannoitteen sisältämän typen  $N_2O$ -päästöihin, jotka olivat selkeästi suurin päästölähde ilmastovaikutusten osalta. Väkilannoitteiden epäsuorien  $N_2O$ -päästöjen oletuskerroin (IPCC 2006) on hieman pienempi kuin orgaanisen lannoitteen, mistä syystä niiden typpikilokohtaiset epäsuorat  $N_2O$ -päästöt olivat myös hieman pienemmät. Myös fosforilannoitteiden sisältämä typpi kasvat-  
taa  $N_2O$ -päästöjä fosforikiloa kohden verrattuna lannoitteisiin, jotka sisältävät tyypeä vähän tai ei ollenkaan. Siten esim. Putretti® turvemaiden metsien lannoitteena oli ilmastonäkökulmasta huonompi lannoite kuin tyypeä sisältämätön verrokkilannoite. Koska kierrätyslannoitteiden  $N_2O$ -päästöjen arvioinnissa käytetään IPCC (2006)  $N_2O$ -oletuskertoimia orgaanisille typpipitoisille sivuvirroille (lanta), ovat ne vain suuntaa antavia. Olisikin tärkeää saada tarkempia arvioita kierrätyslannoitteiden todellisista suorista ja epäsuorista  $N_2O$ -päästöistä sekä turve-  
että kangasmailla.

Tässä tutkimuksessa ei pystytty tarkastelemaan lannoituksen kasvuvaikutuksia ja hiilen sitoutumista kasvavaan puustoon. Lannoituksella voi olla epäsuoria vaikutuksia myös maaperään puuston kasvun kautta vedenottoon ja orgaanisen aineen hajoamiseen. Toisaalta lisääntynyt karikesyöte voi lisätä orgaanisen aineen määrää maaperässä. Nämä kierrätyslannoitteilla tehtyjen metsälannoitusten välilliset vaikutukset ovat merkittävä jatkotutkimuksen kohde.

Kierrätys- ja väkilannoitteiden levitysmääräksi valittiin käytössä olevia suosituksia, joiden seurauksena levitettävät ravinteiden määrät poikkesivat toisistaan. On oletettavaa, että tämä vaikuttaa myös metsän kasvuun sekä maaperän ja kaasukehän väliseen hiilenkiertoon. Jotkin tulokset, esimerkiksi Putretin® elinkaarinen pienempi ilmasto vaikutus, näyttäisi olevan robusti levitysmäärien vaihtelun suhteen. Jotta ilmasto vaikutukset voitaisiin kohdistaa metsästä korjattavaan puumäärään, tai maaperään sitoutuvaan hiileen, kierrätyslannoitteiden ja väkilannoitteiden kasvu vaikutukset pitäisi selvittää ja liittää elinkaarianalyysiin.

Orgaanisia kierrätyslannoitevalmisteita käytettäessä pystytään palauttamaan metsämaahan myös hiiltä, joka kompensoi maaperän hiilen vapautumista. Mikäli kierrätyslannoitteiden mukana maaperään palautuva hiili otettaisiin mukaan kestävyystarkasteluun, kasvaisi ero entisestään uusien kierrätyslannoitevalmisteiden eduksi. Maaperän hiilivarastojen muutosten, eli hiilen sitoutumisen ja vapautumisen laskenta, on kuitenkin vasta alkumetreillään systeemisisissä tuotekohtaisissa laskennoissa. Tässä tutkimuksessa arvioitavien lannoitetuotteiden sisältämän hiilen sitoutumista kangasmaiden tai turvemaiden maaperään ei selvitetty.

Rehevöittävien päästöjen osalta olisi tärkeä tutkia, miten kierrätys- ja väkilannoitteiden sisältämä fosfori huuhtoutuu kangasmailta tai miten lannoitetyppi huuhtoutuu turvemailta ja onko lannoitteen levitystapojen välillä eroja. Ilmasto- ja rehevöittävien vaikutusten lisäksi olisi hyvä myös tutkia lannoitteiden happamoittavia päästöjä. Happamoittavista päästöistä otetaan huomioon lannoitteesta haihtuva ammoniakki sekä rikin ja typen oksidit. Tässä tutkimuksessa ei selvitetty kuinka paljon eri lannoitteet sisältävät ammoniumtyyppiä ja kuinka paljon niistä sitä haihtui. Voidaan kuitenkin olettaa, että kierrätyslannoitteet sisältävät jonkin verran myös ammoniumtyyppiä ja siten muodostavat happamoittavia päästöjä. Happamoittavia rikin ja typen oksideja muodostuu myös kuljetusten ja levitysten polttoainekulutuksista. Levityksen happamoittavat vaikutukset ovat suorassa suhteessa polttoainekulutuksen tuottavuuseroihin. Tutkimuksessa oletettiin, että lannoitteen sisältämä rikki ei lähde happamoittavana rikkihappona liikkeelle vaan erilaisina vesiliukoisina sulfaattiyhdisteinä kuten tuhkalannoitteissa on aikaisemmin todettu (Piirainen ym. 2013). Laajamittaiset sulfaattipäästöt vesistöihin voivat kuitenkin aiheuttaa muutoksia vesikemiassa ja vapauttaa mm. pohjasedimentteihin pidättäytyntä fosforia takaisin vesifaasiin aiheuttaen rehevöitymistä (Mattsson ym. 2017), mutta tässä tutkimuksessa niitä ei otettu huomioon.

Tutkimus osoitti, että ravinteiden kierrätys sivuvirroista ja jätteistä typpipitoisiksi metsälannoiteiksi on mahdollista ja se voidaan tehdä ilmastonäkökulmasta kestävästi. Uusia prosessointitekniikoita pitää kuitenkin kehittää tuotteiden turvallisuuden, ravinnepitoisuuksien ja käsiteltävyyden parantamiseksi.



## Viitteet

- Chemicalbook.com 2020. [https://www.chemicalbook.com/ChemicalProductProperty\\_US\\_CB2200244.aspx](https://www.chemicalbook.com/ChemicalProductProperty_US_CB2200244.aspx)  
[https://www.chemicalbook.com/ChemicalProductProperty\\_US\\_CB4224484.aspx](https://www.chemicalbook.com/ChemicalProductProperty_US_CB4224484.aspx)
- Chemspider.com  
<http://www.chemspider.com/Chemical-Structure.1906.html>  
<https://www.chemspider.com/Chemical-Structure.31105.html>
- Duquesne, S., Le Bras, M., Bourbigot, S., Delobel, R., Camino, G., Eling, B., Lindsay, C. & Roels, T. 2001. Thermal degradation of polyurethane and polyurethane/expandable graphite coatings. *Polymer degradation and stability*, Vol. 74, Issue 3, pp. 493–499.
- EC 2009. Directive 2009/28/EC of the European parliament and of the council of 23 April 2009 on the promotion of the use of energy from renewable sources and amending and subsequently repealing Directives 2001/77/EC and 2003/30/EC. Saatavissa: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/PDF/?uri=CELEX:32009L0028&from=EN>
- Finér, L., Mattsson, T., Joensuu, S., Koivusalo, H., Laurén, A., Makkonen, T., Nieminen, M., Tattari, S., Ahti, E., Kortelainen, P., Koskiahho, J., Leinonen, A., Nevalainen, R., Piirainen, S., Saarelainen, J., Sarkkola S. & Vuollekoski, M. 2010. Metsäisten valuma-alueiden vesistökuormituksen laskenta. *Suomen ympäristö 10/2010*, Suomen ympäristökeskus (SYKE) 33 s.
- Grönroos, J. & Voutilainen, P. 2001. Maatalouden tuotantotavat ja ympäristö. Inventaarioanalyysin tulokset. Suomen ympäristökeskus, Helsinki.
- Grönroos, J., Mattila, P., Regina, K., Nousiainen, J., Perälä, P., Saarinen, K. & Mikkola-Pusa, J. 2009. Development of the ammonia emission inventory in Finland. Revised model for agriculture. *The Finnish Environment* 8/2009. 60 s.
- Guinée, J.B.; Gorrée, M.; Heijungs, R.; Huppes, G.; Kleijn, R.; Koning, A. de; Oers, L. van; Wegener Sleeswijk, A.; Suh, S.; Udo de Haes, H.A.; Bruijn, H. de; Duin, R. van; Huijbregts, M.A.J. 2002. Handbook on life cycle assessment. Operational guide to the ISO standards. Part III: Scientific background. Kluwer Academic Publishers, ISBN 1-4020-0228-9, Dordrecht. 692 p.
- ISO (International Organization for Standardization) 2006a. ISO 14040. Environmental management. Life cycle assessment. Principles and framework. International Organization for Standardization, Brussels.
- ISO (International Organization for Standardization) 2006b. ISO 14044. Environmental management. Life cycle assessment. Requirements and guidelines. International Organization for Standardization, Brussels.
- IPCC 2006. 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories. Prepared by the National Greenhouse Gas Inventories Programme. Eggleston, H.S., Buendia, L., Miwa, K., Ngara, T. & Tanabe, K. (eds.). IGES, Japan. Saatavissa: [https://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2006gl/pdf/4\\_Volume4/V4\\_11\\_Ch11\\_N2O&CO2.pdf](https://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2006gl/pdf/4_Volume4/V4_11_Ch11_N2O&CO2.pdf)
- LIPASTO yksikköpäästöt -tietokanta 2017. Työkoneiden keskimääräinen päästö ja energia polttoainelitraa kohden Suomessa vuonna 2016. Teknologian tutkimuskeskus VTT Oy. [http://lipasto.vtt.fi/yksikkopaastot/muut/tyokoneet/tyokoneet\\_litra.htm](http://lipasto.vtt.fi/yksikkopaastot/muut/tyokoneet/tyokoneet_litra.htm)

- Marttinen, S., Tampio, E., Sinkko, T., Timonen, K., Luostarinen, S., Grönroos, J. & Manninen, K. 2015. Biokaasulaitokset – syötteistä lopputuotteisiin. *Energia, ravinteet ja ympäristövai-  
kutukset*. Luonnonvara- ja biotalouden tutkimus 14/2015. 67 s.
- Mikkola, H. & Ahokas, J. 2009. Energy ratios in Finnish agricultural production. *Agricultural and  
Food Science* 18: 332–346.
- Munoz, I. & Schmidt, J.H. 2016. Methane oxidation, biogenic carbon, and the IPCC’s emission  
metrics. Proposal for a consistent greenhouse-gas accounting. *The International Journal  
of Life Cycle Assessment* 21: 1069–1075.
- Nieminen, M., Laurén, A., Hökkä, H., Sarkkola, S., Koivusalo, H. & Pennanen, T. 2011. Recycled  
iron phosphate as a fertilizer raw material for tree stands on drained boreal peatlands.  
*Forest Ecology and Management* 261(1): 05–110.
- Piirainen S., Finér, L., Mannerkoski, H. & Starr, M. 2004. Effects of forest clear-cutting on the  
sulphur, phosphorus and base cations fluxes through podzolic soil horizons. *Biogeo-  
chemistry* 69 (3): 405–424.
- Peng, Z. & Kong, L.X. 2007. A thermal degradation mechanism of polyvinyl alcohol/silica nano-  
composites. *Polymer Degradation and Stability*, Vol. 92, Issue 6. Pp. 1061–1071.
- Regina, K. & Heikkinen, J. 2019. Toimintasuositukset – Eloperäiset aineet ja maan hiilivarasto.  
Maanparannusaineiden hiilitasevaikutuksen mallinnus (MAHTAVA) -hanke. Policy brief.  
3 s.
- Regina, K., Heikkinen, J. & Luostarinen, S. 2018. Maanparannusaineiden hiilitasevaikutuksen  
mallinnus (MAHTAVA). Powerpoint-esitys. MATO-tutkimusohjelman vuosiseminaari  
7.2.2018. Saatavissa: [https://mmm.fi/documents/1410837/3476612/Regina\\_Mah-  
tava\\_MATO\\_2018.pdf/5ce012ee-d944-48cf-9a1a-78191eec2970/Regina\\_Mah-  
tava\\_MATO\\_2018.pdf](https://mmm.fi/documents/1410837/3476612/Regina_Mah-<br/>tava_MATO_2018.pdf/5ce012ee-d944-48cf-9a1a-78191eec2970/Regina_Mah-<br/>tava_MATO_2018.pdf)
- Seppälä, J., Knuuttila, S. & Silvo, K. 2004. Eutrophication of aquatic ecosystems. A new method  
for calculating the potential contributions of nitrogen and phosphorus. *International  
journal of life cycle assessment* 9(2): 90–100.
- Skowronska, M. & Filipek, T. 2014. Life cycle assessment of fertilizers: a review. *International  
Agrophysics* 28: 101–110.
- Solomon, S., Qin, D., Manning, M., Alley, R.B., Berntsen, T., Bindoff, N.L., Chen, Z., Chidthaisong,  
A., Gregory, J.M., Hegerl, G.C., Heimann, M., Hewitson, B., Hoskins, B.J., Joos, F., Jouzel,  
J., Kattsov, V., Lohmann, U., Matsuno, T., Molina, M., Nicholls, N., Overpeck, J., Raga, G.,  
Ramaswamy, V., Ren, J., Rusticucci, M., Somerville, R., Stocker, T.F., Whetton, P., Wood,  
R.A. & Wratt, D. 2007. Technical Summary. In: *Climate Change 2007: The Physical Sci-  
ence Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the  
Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press, Cambridge.  
Pp. 19–91.
- Zvahn, O. & Björklund, E. 2015. Thermal stability assessment of antibiotics in moderate tem-  
perature and subcritical water using a pressurized dynamic flow-through. *International  
Journal of Innovation and Applied Studies*, 11(4). ISSN: 2028-9324.
- Tao, W. & Ukwuani, A.T. 2015. Coupling thermal stripping and acid absorption for ammonia  
recovery from dairy manure: Ammonia volatilization kinetics and effects of temperature,

pH and dissolved solids content. Chemical Engineering Journal, vol. 280, Nov 2015. Pp. 188–196.

Tita, I.C., Tita, B., Toma, C.C. & Marian, E. 2017. Thermal Behaviour of Valsartan Active Substance and in Pharmaceutical Products. Revista de Chimie – Bucharest – Original Edition, 68(10). Pp. 2307–2310. Doi: 10.37358/RC.17.10.5874

Valuatlas 2020. Polyeteeni (PE). <https://www.valuatlas.fi/node/103>

Väätäinen, K., Sirparanta, E., Räisänen, M. & Tahvanainen, T. 2011. The costs and profitability of using granulated wood ash as a fertilizer in drained peatland forests. Biomass and Bioenergy 35: 3335–3341.

Yara 2011. Lannoitiedat MTT:n perunatutkimukseen. Henkilökohtainen tiedonanto sähköpostitse.



luke.fi

Luonnonvarakeskus  
Latokartanonkaari 9  
00790 Helsinki  
puh. 029 532 6000